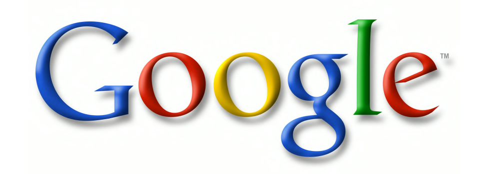
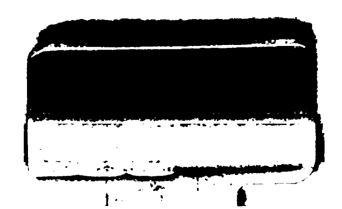






ESSAIS INDUSTRIELS

DES

MACHINES ÉLECTRIQUES

ET DES

GROUPES ÉLECTROGÈNES.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
32966 Quai des Grands-Augustins, 55.

CONFÉRENCES DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ.

ESSAIS INDUSTRIELS

DES

MACHINES ÉLECTRIQUES

ET DES

GROUPES ÉLECTROGÈNES,

PAR

F. LOPPÉ,

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1904

ABRÉVIATIONS.

a.	Ampère.
v.	Volt.
w.	Watt.
Ω	Ohm.
a. m.	Ampèremètre.
v. m.	Voltmètre.
w. m.	Wattmètre.
d. d. p.	Différence de potentiel.
f. e. m.	Force électromotrice.
t/m.	Nombre de tours par minute.
#	Proportionnel à.

ESSAIS INDUSTRIELS

DES

MACHINES ÉLECTRIQUES

ET DES

GROUPES ÉLECTROGÈNES.

CHAPITRE I.

BUT ET ORGANISATION DES ESSAIS.

---

§ 1. — **But des essais.**

Les essais des machines électriques doivent permettre de se rendre compte :

1° De la qualité de leur construction ;
2° De leur bon fonctionnement ;
3° De leur rendement (au besoin, à diverses charges).

Dans les essais destinés à se rendre compte de la qualité de la construction, on doit particulièrement examiner si les divers enroulements peuvent supporter les tensions auxquelles ils sont soumis pendant le fonctionnement de la machine et même les surélévations de tension éventuelles, et si l'élévation de température résultant de la transformation en chaleur de l'énergie dissipée dans la machine ne peut arriver à la longue à détériorer cette dernière.

Ces deux séries d'essais se font d'une manière identique pour les diverses espèces de machines électriques.

Les essais destinés à se rendre compte du bon fonctionnement varient naturellement avec chaque genre de machine.

La détermination du rendement, ou rapport de la puissance recueillie à la machine à la puissance qui lui est fournie peut se faire, soit par des méthodes générales applicables à toutes les génératrices ou à tous les moteurs, soit par des méthodes particulières à chaque genre de machine.

§ 2. — Conduite des essais.

Pendant la durée des essais, on doit naturellement relever toutes les indications nécessaires pour se rendre compte des diverses circonstances du fonctionnement. Le mieux est d'établir pour chaque essai une feuille sur laquelle les divers relevés sont rapportés dans des colonnes correspondantes. Si, par exemple, on emploie des appareils de mesure à lecture non directe, comme des a. m. à shunt, des w. m., etc., on inscrira dans la colonne réservée à cet effet sur la feuille la lecture, en ayant soin d'indiquer dans la colonne *observations,* la constante de l'instrument. L'essai terminé, on calculera les valeurs réelles de l'intensité ou de la puissance d'après la constante et on les inscrira dans la colonne réservée à cet effet à côté de celle où sont inscrites les lectures.

Il est toujours bon, même quand on n'a à faire qu'un seul essai à une charge donnée, par exemple, de procéder à plusieurs relevés avec des charges un peu inférieures et un peu supérieures, afin de pouvoir ensuite tracer des courbes permettant de vérifier si les relevés pour la charge donnée concordent bien avec les autres. On ne peut pas, du reste, toujours obtenir tout à fait exactement la charge voulue. On arrive en procédant ainsi à des résultats beaucoup plus exacts que si l'on n'a procédé qu'à des relevés correspondant à la charge voulue.

Quand plusieurs opérateurs prennent part à un essai et sont chargés des lectures ou relevés des divers instruments, il faut que ces relevés aient lieu simultanément et au commandement. On peut, par exemple, donner le signal des lectures par un coup de timbre, etc. L'opérateur chargé de l'un des instruments commande alors aux autres. Ainsi, lors d'un essai au frein, c'est l'opérateur chargé de la manœuvre de ce dernier qui prend le commandement;

il saisit le moment où l'équilibre de son appareil est bien établi pour donner le signal de procéder aux diverses mesures.

Quand des relevés exigent un certain temps, comme, par exemple, la mesure de la vitesse au moyen d'un compte-tours, le relevé des diagrammes d'une machine à vapeur, etc., on doit s'arranger pour que les lectures aux divers appareils soient faites au milieu de l'espace de temps nécessaire à ces relevés; les opérateurs doivent, en outre, s'assurer qu'il n'y a pas de variation brusque dans les indications de leurs appareils pendant toute la durée du relevé le plus long, sans cela l'opération devrait être recommencée.

Ainsi, dans un essai de groupe électrogène à vapeur, si l'on doit compter les t/m. pendant une minute, c'est l'opérateur chargé de la mesure de la vitesse qui prendra le commandement (ou, au besoin, celui chargé du compte-secondes). La charge ayant la valeur voulue (ce qu'indique l'opérateur chargé de la surveillance du frein), on commence à compter les tours; au bout de 20 secondes environ, on donne l'ordre aux opérateurs chargés de relever les diagrammes de commencer leurs opérations; à la 30e seconde, les opérateurs chargés de la lecture aux divers appareils : manomètre, a. m., v. m., etc., doivent être avertis d'avoir à procéder aux relevés.

§ 3. — **Organisation des essais.**

Dans les divers essais, on doit mesurer des quantités mécaniques et électriques, pendant que les machines développent une puissance donnée, c'est-à-dire fonctionnent sous une certaine charge. Il faut donc employer des appareils de mesure et en outre avoir des dispositifs permettant de charger les machines à la valeur voulue.

La charge des génératrices est obtenue soit en absorbant l'énergie dans des résistances, soit en actionnant des moteurs ou des appareils utilisateurs. La charge des moteurs est obtenue soit au moyen d'un frein d'absorption, soit en leur faisant actionner des génératrices.

EMPLOI DES INSTRUMENTS DE MESURE MÉCANIQUES.

Pour déterminer la puissance mécanique fournie à une machine, il faut mesurer simultanément la vitesse ou le t/m. et le couple ou la pression moyenne.

a. Mesure des vitesses ou t/m. — Pour une machine à mouvement lent, on peut compter directement les tours pendant un temps déterminé, soit au moyen des alternances, dans le cas d'une machine à piston, soit en faisant une marque sur le volant. Au delà de 100 t/m., on ne peut plus avoir recours à ce procédé, et l'on emploie des compte-tours, des tachymètres ou des cinémomètres [1].

Certains compte-tours donnent directement le t/m. sans que l'on ait besoin de mesurer le temps pendant lequel on applique le pointeau contre l'arbre de la machine; d'autres donnent simultanément la durée du temps d'application et le nombre de tours. Quand on a un compte-tours donnant simplement les indications du nombre de tours, la manière d'opérer donnant le plus d'exactitude est de faire procéder à la détermination par deux opérateurs, l'un étant chargé du compte-tours, l'autre du compte-secondes. Un peu avant de déclencher le compte-secondes (ou avant que l'aiguille n'arrive sur le zéro, dans le cas où il n'est pas à déclenchement) l'opérateur chargé de cet instrument commande « attention »; l'autre opérateur place alors le pointeau du compte-tours en face de la cavité ménagée dans l'axe de l'arbre pour le recevoir; au moment où le premier opérateur déclenche le compte-secondes, il crie « hop » et le deuxième appuie le pointeau contre l'arbre; quelques secondes avant la fin de l'opération, le premier opérateur commande « attention », puis « hop » au moment exact de la fin de l'opération. La durée du comptage doit être au minimum de 30 secondes, et il vaut mieux, quand la vitesse est régulière, compter pendant 1 minute.

Certains compte-tours sont munis d'un timbre qui résonne tous les cent tours, par exemple; on peut alors, suivant le t/m. de la machine, mesurer le temps qui s'écoule pour un multiple plus ou moins grand de cent tours au moyen d'un compte-secondes à déclenchement.

Pour des machines de très faible puissance, en appliquant le compte-tours contre l'arbre, on augmente les frottements d'une quantité relativement considérable et l'on peut ainsi fausser les résultats de la mesure; on peut alors maintenir à l'extrémité de l'arbre, au moyen d'un dispositif convenable, un compte-tours à

---

(1) *Voir* MONTPELLIER et ALIAMET, *Mesures et essais industriels*, 1er Volume.

sonnerie, entraîné d'une manière permanente par celui-ci, et mesurer le temps qui s'écoule pendant que la machine fait un certain nombre de fois 100 tours, ou bien employer un tachymètre à poste fixe bien étalonné et tenir au besoin compte de la puissance absorbée par cet appareil.

Nous examinerons, au sujet de l'étude des moteurs asynchrones, certaines méthodes optiques permettant de mesurer des vitesses relatives.

Les tachymètres et cinémomètres donnent directement à chaque instant la vitesse d'un arbre, ils peuvent être transportables et munis d'un pointeau comme un compte-tours ou être à poste fixe et commandés par courroie ou au moyen d'un fil; il faut alors bien vérifier s'il ne se produit pas de glissement et procéder à un étalonnement. On peut également, dans certains essais, employer des tachymètres enregistreurs ou des cinémographes.

Dans des essais de dynamos à courant continu à vide, quand l'excitation reste constante, on peut employer un v. m. pour la détermination de la valeur instantanée de la vitesse; nous reviendrons sur ce sujet dans les détails des essais.

Les tachymètres sont particulièrement utiles quand on doit maintenir constante la vitesse d'une machine; on règle alors la machine de manière que l'aiguille de l'appareil se maintienne dans la position donnée; on peut se servir dans ce cas d'appareils rudimentaires; nous avons employé par exemple avec succès des entraîneurs pour bicyclettes du système Volta.

Dans des essais de longue durée, par exemple, ceux de consommation d'une machine à vapeur, on peut employer avec avantage des compte-tours totalisateurs permettant de déterminer la vitesse moyenne pendant toute la durée de l'essai.

Dans la mesure du travail transmis à une machine, le couple peut se mesurer à l'aide d'un *dynamomètre de transmission* (1).

Nous parlerons en détail, au sujet des groupes électrogènes à vapeur et à gaz, de la mesure de la pression moyenne sur un piston au moyen des *indicateurs*.

---

(1) *Voir* à ce sujet : MONTPELLIER et ALIAMET, *Mesures et essais industriels*, 1 Volume. — J. BUCHETTI, *Guide pour l'essai des machines*. — J.-B. THURSTON, *Essais des machines à vapeur*.



Dans des essais de machines à vide, on peut déterminer le couple ou le travail des résistances passives par la méthode du lancer ou d'amortissement.

Méthode du lancer. — Quand un corps tournant autour d'un axe et animé d'une certaine vitesse est abandonné à lui-même, il continue à tourner, sa vitesse diminuant de plus en plus jusqu'à ce qu'il s'arrête.

Si ω est la vitesse angulaire à un moment donné, M le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe de rotation, la puissance vive est

$$\frac{M\omega^2}{2}.$$

A chaque instant, si C est le couple résistant, on a en valeur absolue

$$M\omega \frac{d\omega}{dt} = C\omega,$$

$$C = M \frac{d\omega}{dt}.$$

$C\omega$ est l'effort résistant.

M étant une constante.

Si l'on connaît à chaque instant la valeur de ω et $\frac{d\omega}{dt}$, on pourra en déduire la valeur de l'effort et du couple résistants.

La valeur de $\frac{d\omega}{dt}$ peut se déterminer (à une constante près) sur la courbe donnant la valeur de ω ou du t/m. N $\left(\text{on a } N = \frac{30\omega}{\pi}\right)$ en fonction du temps.

Pour tracer cette courbe, on peut procéder de la manière suivante : on entraîne la machine par courroie à l'aide d'un petit moteur, et, quand elle a atteint une vitesse supérieure à la vitesse normale, on fait sauter brusquement cette courroie. On relève alors à intervalles réguliers (toutes les 3 ou 5 secondes par exemple) les indications d'un tachymètre relié à la machine (ou au besoin d'un v. m.); on peut alors, d'après ces relevés, tracer la courbe donnant à chaque instant la vitesse en fonction du temps (*fig.* 1).

Quand on a affaire à une dynamo à courant continu, on peut la lancer comme moteur en appliquant une d. d. p. donnée à ses

bornes, puis supprimer le courant (*voir*, à ce sujet, les essais des dynamos à courant continu).

On peut obtenir directement le tracé de la courbe au moyen d'un tachymètre enregistreur ou d'un cinémographe. L'adjonction d'un tachymètre augmente naturellement l'effort résistant de la machine, et il faut au besoin en tenir compte.

M. Boucherot ([1]) a imaginé un petit appareil simple, qui s'emploie comme un compte-tours à pointeau, et qui permet d'obtenir, sur un papier enroulé sur un cylindre enregistreur, une courbe $\omega^2 = f(\alpha)$, c'est-à-dire donnant le carré de la vitesse en fonction de l'espace angulaire parcouru. Il est facile de voir que le coefficient angulaire de la tangente en un point quelconque de la courbe est égal, à une constante près, au couple moteur.

La valeur de la vitesse ou du t/m. à chaque instant peut également être déduite de la courbe donnant le nombre total de tours qu'a faits la machine depuis une origine donnée du temps. La vitesse (ou le t/m.) est proportionnelle au coefficient angulaire de la tangente à cette courbe.

Si le t/m. normal de la machine est inférieur à 200, on peut tracer la courbe du nombre total de tours en relevant à intervalles réguliers (toutes les 5 secondes par exemple) les indications d'un compte-tours totalisateur.

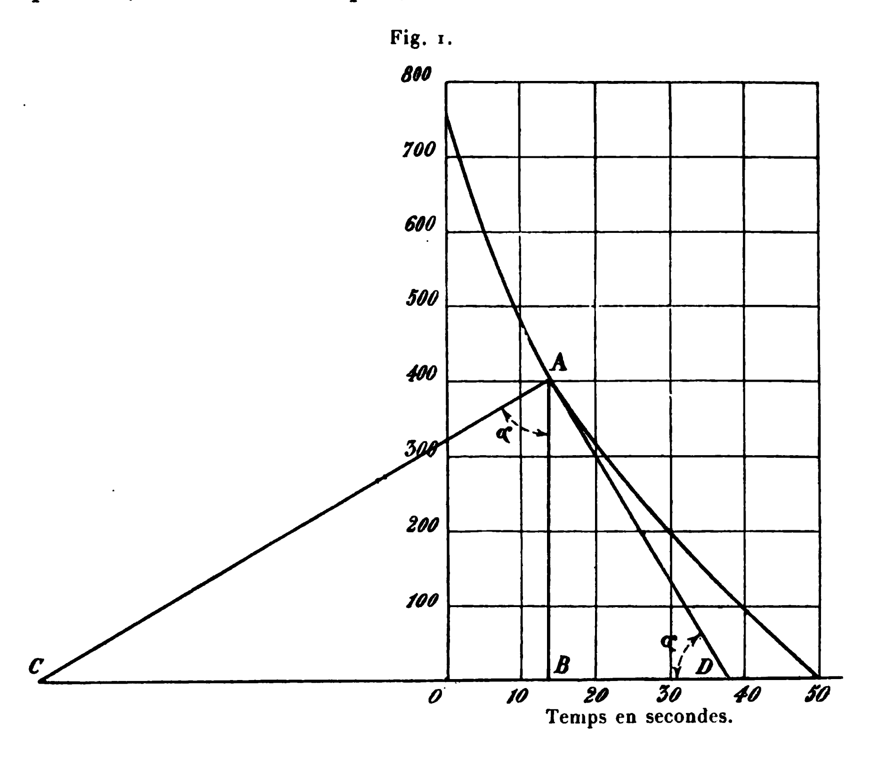
On peut également se servir d'un compte-tours donnant un coup de timbre quand la machine a effectué un certain nombre de tours. On détermine alors au moyen d'un compte-secondes les intervalles de temps qui s'écoulent entre les coups de timbre successifs, ou entre 2, 3, 4, etc., coups de timbre, suivant la vitesse de la machine. On peut aussi obtenir le tracé de cette courbe au moyen d'un appareil spécial commandé par la machine. On peut, pour cela, employer, soit l'odographe que M. le Dr Marey a imaginé, soit un enregistreur totalisateur de marche pour automobile de M. J. Richard, en y adaptant un tambour d'enregistrement à grande vitesse.

Quand la courbe de la vitesse angulaire (ou du t/m.) en fonction du temps est tracée, on peut facilement, à une constante près, déterminer la valeur du couple et de l'effet résistant pour une vitesse donnée.

([1]) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens,* de 1898.

Le coefficient angulaire de la tangente à la courbe en un point est proportionnel à $\frac{d\omega}{dt}$; connaissant la valeur de M qui est une constante et le coefficient de proportionnalité, on peut en déduire la valeur du couple résistant. On peut également déterminer graphiquement, à une constante près, la valeur du travail résistant.

Fig. 1.



On a (*fig.* 1) $\tang\alpha = \frac{d\omega}{dt}$; la sous-normale BC est égale à AB tangα, et, comme AB est proportionnel à ω, la sous-normale est proportionnelle à $\omega \frac{d\omega}{dt}$, c'est-à-dire égale, à une constante près, à l'effort résistant.

Il est à peu près impossible de calculer le moment d'inertie, mais on peut déterminer expérimentalement la constante.

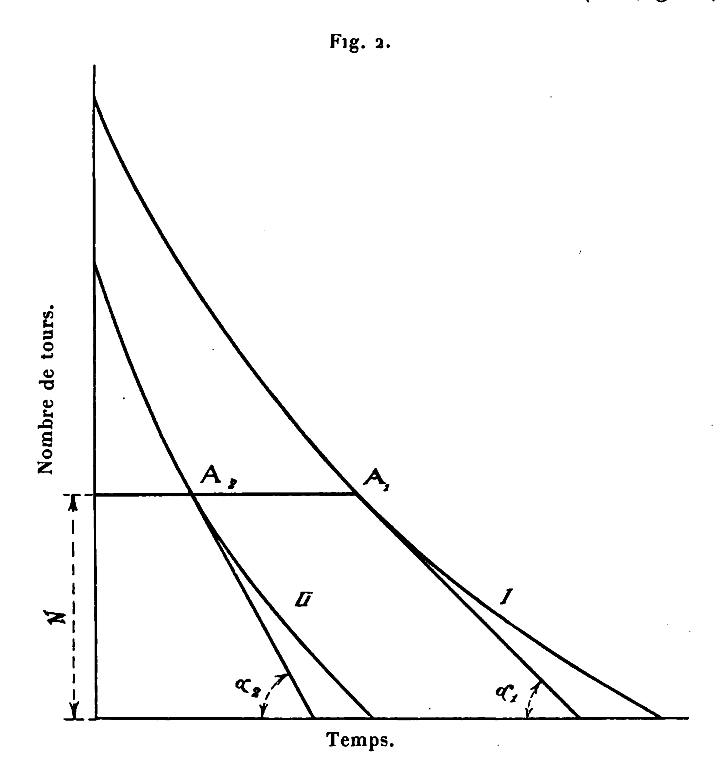
Dans certains cas (*voir* les essais des dynamos à courant continu) on peut mesurer directement l'effort résistant (en déduire la valeur du couple) pour un t/m. donné, ce qui permet de déterminer les

valeurs des constantes. Naturellement on répète l'opération pour diverses vitesses et l'on prend la moyenne des valeurs obtenues.

Quand on ne peut mesurer directement la valeur de l'effort résistant pour une vitesse donnée, on peut déterminer les constantes par la méthode indiquée par M. Routin [1].

On procède au relevé d'une première courbe (courbe I, *fig.* 2) en lançant la machine à vide, puis on place sur l'arbre ou la poulie un petit frein donnant un couple résistant C, et l'on renouvelle l'expérience. On obtient alors une seconde courbe (II, *fig.* 2), le

Fig. 2.



temps pour arriver au repos étant naturellement diminué. Si C_r est le couple résistant correspondant au t/m. N, on a pour la courbe I

$$C_r = K \operatorname{tang} \alpha_1,$$

[1] *Le Laboratoire électrique* de J.-A. FLEMING, traduit par Routin.

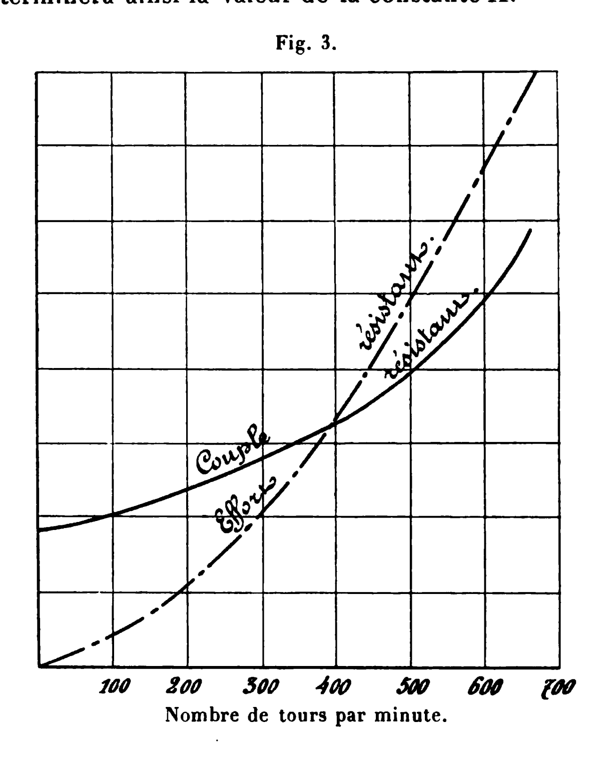
pour la courbe II

$$C + C_r = K \tang \alpha_2,$$

$$\tang \alpha_2 - \tang \alpha_1 = \frac{C}{K}.$$

On déterminera ainsi la valeur de la constante K.

Fig. 3.



Pour obtenir le petit couple C, il suffit d'attacher à l'extrémité d'une cordelette ou du ruban un poids donné P, d'enrouler une partie de la cordelette ou du ruban sur la poulie ou l'arbre et de faire en sorte que le brin que l'on tient à la main ne soit pas tendu pendant l'essai (*voir* p. 31 et 32).

Si r est le rayon de la poulie ou de l'arbre, on a :

$$C = pr.$$

Après avoir déterminé les valeurs des constantes, on peut calculer les couples et les efforts résistants et tracer les courbes les représentant (*fig.* 3).

EMPLOI DES INSTRUMENTS DE MESURES ÉLECTRIQUES.

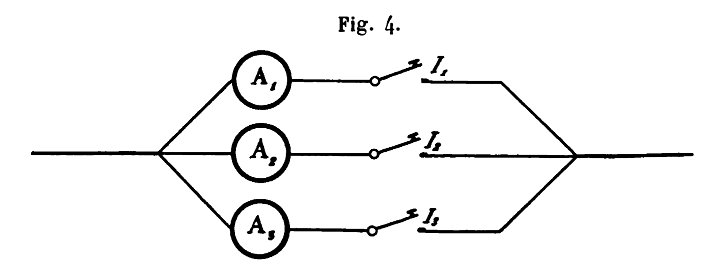
On doit naturellement employer des appareils aussi précis que possible et au besoin corriger leurs indications d'après les données de leur étalonnement ([1]).

Dans certains essais délicats, avec des instruments à fil chaud, il est nécessaire de tenir compte du courant et de la puissance absorbés par ces appareils, qui peuvent avoir une importance relative assez considérable.

Ainsi un v. m. laisse passer un courant d'une intensité $\frac{r}{\varepsilon}$, ε étant la d. d. p. et r sa résistance, et un a. m. provoque une chute de tension de rI v. Des v. m. à fil chaud peuvent absorber un courant atteignant 0,2 a. et des a. m. provoquent des chutes de tension de 1 v. et plus.

Il faut avoir soin de disposer convenablement les appareils et par exemple de soustraire certains d'entre eux à l'influence des dérivations magnétiques, etc. Il y a naturellement grand intérêt à utiliser toujours la partie moyenne de l'échelle des appareils de manière à avoir des lectures bien nettes. C'est-à-dire que l'on est souvent amené à employer successivement dans un même essai plusieurs appareils pour la mesure de la même quantité.

Fig. 4.



Dans certaines mesures d'intensité on ne peut interrompre le courant sans que cela ait une influence (*voir* le relevé des caractéristiques à vide) sur le résultat; pour remplacer un a. m. (ou un shunt) par un autre, on peut alors employer le montage indiqué figure 4.

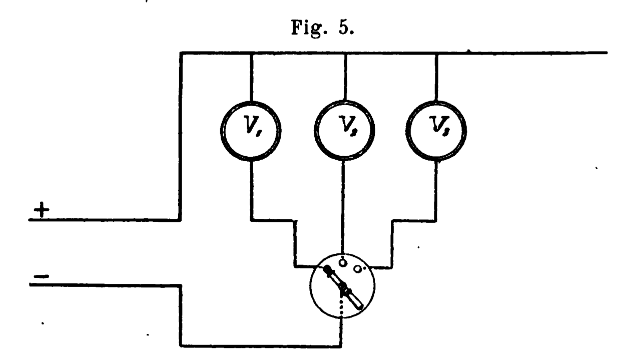
([1]) *Voir* ARMAGNAT, *Instruments et méthodes de mesures électriques industrielles.*

On monte les a. m. (ou shunts) A_1, A_2, A_3, gradués pour diverses intensités, de manière à pouvoir les intercaler dans le circuit ou les en retirer en manœuvrant les interrupteurs I_1, I_2, I_3.

Supposons que le courant augmente peu à peu d'intensité, on ferme d'abord l'interrupteur I_1 seul et l'on procède aux premières lectures avec l'a. m. A_1. Quand l'intensité augmente de manière à attendre la limite de la graduation de cet appareil, on ferme l'interrupteur I_2, puis on ouvre I'_1, et l'on procède aux lectures au moyen de A_2, etc.

Le montage indiqué sur la figure 5 permet de se servir successi-

Fig. 5.



vement de divers v. m. ou de mettre en circuit les diverses résistances du circuit à fil fin d'un w. m., ce système de montage est particulièrement à recommander quand on emploie des tensions assez élevées, car il permet de mettre un appareil en circuit sans toucher aux fils.

Dans le cas où l'on a affaire à des courants très intenses, il faut faire attention aux connexions; si l'on a particulièrement à raccorder par exemple des barres de fer entre elles ou avec des barres de cuivre, on pourra diminuer la résistance du joint en intercalant du papier d'étain ou en employant des amalgames.

Dans les mesures de courants alternatifs, soit à très hautes tensions, soit à grandes intensités, on emploie avec avantage des transformateurs de mesure, réduisant dans des proportions données soit la tension, soit l'intensité.

Il faut avoir soin d'intercaler *des fusibles dans les circuits* afin de ne pas risquer, par une fausse manœuvre quelconque, de brûler, soit les machines, soit les appareils de mesure.

§ 4. — Dispositifs pour la mise en charge des génératrices et des moteurs.

MISE EN CHARGE DES GÉNÉRATRICES.

On peut, pour mettre en charge une génératrice, employer des moteurs ou des appareils utilisant le courant; dans certaines méthodes d'essai, ainsi qu'on le verra, l'énergie fournie par la machine peut servir en partie à actionner le moteur qui l'entraîne.

On est cependant souvent obligé d'absorber l'énergie électrique dans des rhéostats.

On peut alors employer, soit des rhéostats liquides, soit des rhéostats de lampes à incandescence, soit encore des rhéostats en charbon ou des rhéostats métalliques.

a. Rhéostats liquides. — Les rhéostats liquides constitués par deux plaques métalliques, plongeant dans de l'eau additionnée au besoin d'une substance la rendant plus conductrice, sont très faciles à fabriquer, mais malheureusement il n'est guère possible d'obtenir avec eux pendant un certain temps un courant d'intensité bien constante, et en outre, s'ils ne sont pas construits avec beaucoup de soin, ils peuvent facilement provoquer des courts-circuits.

On peut régler un rhéostat liquide de trois manières.

1° En faisant varier la concentration et par conséquent la conductibilité du liquide;

2° En faisant varier l'écartement des plaques;

3° En faisant varier la surface immergée de l'une ou des deux plaques.

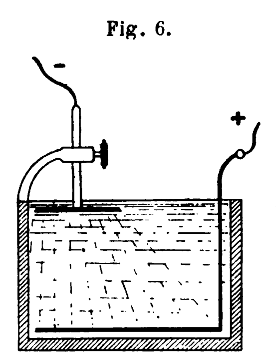
Les plaques peuvent être disposées verticalement, et des renvois de mouvement peuvent permettre de faire varier leur écartement, ou au besoin de soulever plus ou moins l'une ou l'autre ou toutes les deux.

On emploie ordinairement des bacs en bois ou au besoin en grès; il faut éviter l'emploi du verre, car il peut casser, la température du liquide arrivant à 100°. Il ne faut pas employer un récipient métallique, ou bien, si on le fait, il faut en enduire l'intérieur avec une

substance isolante, sans cela le courant se ferme par les parois et tout réglage devient impossible.

M. F. Doane a construit des rhéostats liquides très commodes (*fig.* 6) en disposant les deux plaques horizontalement dans

Fig. 6.



un bac en bois. La plaque inférieure est disposée sur le fond du bac et la plaque supérieure, de dimensions moindres, peut être abaissée ou soulevée. Quand les plaques sont verticales et non complètement immergées, l'écume se formant à la surface du liquide est parfois plus conductrice que ce dernier et l'on est exposé à de grandes variations du courant quand le liquide bouillonne fortement.

L'eau ordinaire a une résistance très élevée, et, pour des tensions moyennes, les plaques doivent être si rapprochées que tout réglage devient impossible; on n'emploie des rhéostats à eau pure que pour des tensions élevées, atteignant 400 v. à 500 v. au moins.

A l'exposition panaméricaine de Buffalo un rhéostat à eau pure fonctionnait sous 11 000 v., pour le réglage de l'intensité de lampes à incandescence. M. H.-S. Webb [1] a donné les renseignements suivants sur des rhéostats à eau pure.

Dans un baril de $49^{cm},6$ de diamètre, soit 1930^{cm^2} de section, étaient disposées horizontalement deux plaques de fer; pour un écartement de 67^{cm}, on avait un courant de 2,6 a. sous une d. d. p. de 486 v.

La résistance était donc de $\frac{486}{2,6} = 187\,\Omega$.

La surface étant de 1930^{cm} (car il faut compter la section totale

(1) *American Electrician;* février 1898.

de liquide et non seulement la surface des plaques immergées), la résistivité de l'eau par $\frac{cm}{cm^2}$ était :

$$\rho = \frac{rs}{e} = \frac{187 \times 1930}{67} = 5372\,\Omega.$$

Pour un écartement des plaques de $2^{cm},22$ et une d. d. p. de 228 v. l'intensité du courant (qui a pu être maintenue constante pendant 1 heure) était de 35,5 a.

Dans ce cas, on a :

$$r = \frac{228}{35,5} = 6,42\,\Omega,$$

$$\rho = \frac{6,42 \times 1930}{2,22} = 5581\,\Omega.$$

D'après M. Hauchett, la résistivité de l'eau pure est de 3048 Ω; un autre essai de M. Webb a donné 5700 Ω; les différences doivent provenir du plus ou moins grand degré de pureté de l'eau.

On peut maintenir le courant pendant très longtemps en renouvelant l'eau, en faisant par exemple circuler de l'eau froide entre les plaques.

Pour rendre l'eau plus conductrice, on l'additionne d'acide sulfurique, de sel ordinaire, de soude, de sel ammoniac, etc., les plaques étant en fer ou en plomb. On peut également employer du sulfate de cuivre, mais alors la plaque positive doit être en cuivre.

Il est difficile de calculer les dimensions d'un rhéostat liquide, et surtout la quantité de substance à ajouter à l'eau pour lui donner une conductibilité voulue.

Il ne faut pas dépasser une densité de courant de 0,2 a. environ par centimètre carré de section du liquide.

Le mieux est, après avoir mis en place les plaques dans de l'eau pure, d'ajouter peu à peu la substance voulue (en se servant pour cela d'une solution concentrée) en agitant au moyen d'un bâton pour bien mélanger.

La résistance d'une solution diminue quand la température augmente; si r_0 est la résistance à t^o, la résistance r_1 à t_1^o est donnée par la relation

$$r_1 = r\,\frac{1}{1 + a(t_1 - t) + b(t_1 - t)^2}.$$

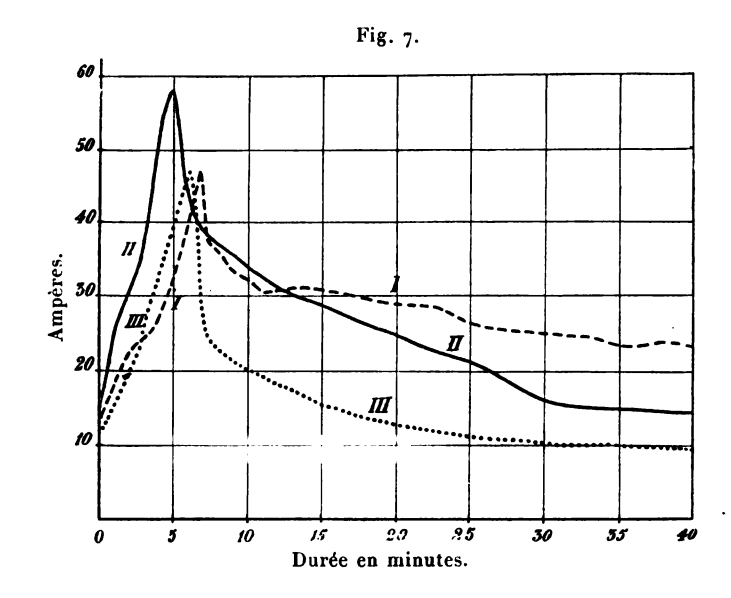
En pratique on peut négliger le terme en b.

Le tableau suivant donnant la résistivité ρ, en ohms $\frac{cm}{cm^2}$ à 18°, de mélanges d'eau et de diverses substances, ainsi que la valeur correspondante de a, peut servir pour déterminer approximativement les constantes d'un rhéostat liquide.

Sel ordinaire. $a = 0,0216$.		Acide sulfurique. $a = 0,0177$.		Soude. $a = 0,021$.		Sel ammoniac. $a = 0,0199$.		Sulfate de cuivre. $a = 0,0195$.	
pour 100 en poids.	ρ.	pour 100 en poids.	ρ.	pour 100 en poids.	ρ.	pour 100 en poids.	ρ.	pour 100 en poids.	ρ.
0,058	1030	0,174	125,6	0,04	53,4	0,05	870,00	0,074	1468,0
0,57	116	0,435	53,3	0,4	5,07	5	11,5	0,74	235,0
5	15,9	0,724	33,5	4	6,5	10	6,0	2,5	97,0
10	8,8	0,985	25,9	17	3,0	20	3,1	5,0	56,0
20	5,4	1,000	23,2	30	5,2			10,0	33,0
25	5,0	2,500	9,8					saturée	29,3

Les courbes de la figure 7, tracées par M. B. Park-Ruckers (1),

Fig. 7.



montrent la variation de l'intensité du courant dans un rhéostat

(1) *American Electrician;* février 1901.

liquide, en fonction de la durée du passage du courant, quand on ne fait varier ni la densité du liquide ni l'écartement des plaques.

Le rhéostat était constitué par un bac en bois contenant $3^{l},78$ d'eau; les plaques verticales en fer de $0^{cm},48$ d'épaisseur avaient une largeur de $7^{cm},6$ et une hauteur de 10^{cm}, étaient complètement immergées et maintenues parallèlement à une distance de $8^{cm},9$; on a mis juste assez de substance (sel ammoniac, sel marin ou soude) pour obtenir une intensité convenable au commencement.

La courbe I se rapporte au sel ammoniac, la courbe II au sel marin, la courbe III à la soude.

Les rhéostats liquides peuvent être employés dans les essais de courant alternatif, mais alors il faut prendre garde, car ils peuvent avoir une certaine capacité.

Nous avons par exemple entendu un jeune ingénieur, à la suite de l'essai d'un alternateur sur des résistances liquides, prétendre que le type d'alternateur était parfait et qu'il n'avait pas de réaction d'induit; le fait était dû à la capacité de la résistance employée.

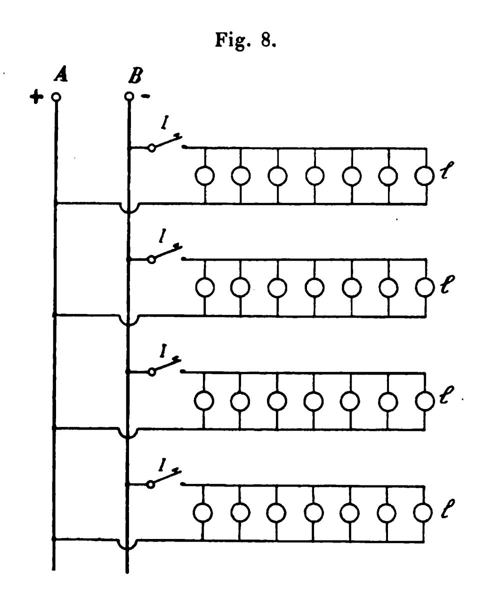
b. Rhéostats de lampes à incandescence. — Pour des intensités moyennes (jusqu'à 200 a.) et une tension inférieure à 400 v., on peut employer avantageusement des rhéostats de lampes à incandescence.

La figure 8 donne un schéma de montage d'un rhéostat de lampes; *a, a* sont les douilles des lampes montées sur des barres transversales en bois, A et B les bornes du rhéostat, et I des interrupteurs unipolaires commandant une série de lampes (ordinairement 10).

Quand on peut se procurer facilement des lampes pour douilles à vis, il est commode d'employer ce système, car on peut retirer une lampe du circuit sans enlever l'ampoule de la douille. Quand on est obligé d'employer des lampes pour douilles à baïonnette, il faut retirer l'ampoule de la douille; il est bon alors de disposer au sommet du châssis du rhéostat une planchette percée de trous, dans lesquels on place les lampes non utilisées. En constituant par exemple de lampes à 100 volts, un rhéostat de 100 lampes (10 séries de 10 lampes) la résistance intercalée peut varier de 800 Ω (1 lampe de 5 bougies seule) à 2,2 Ω (100 lampes de 16 bougies).

Quand la tension dépasse 100 v., on peut disposer des rhéostats en série; on peut également employer des lampes à 220 v.

Fig. 8.



Quand la tension aux bornes d'un rhéostat de lampes est moins élevée que la tension normale des lampes, la résistance de ce dernier est plus élevée que pour la tension normale, car les lampes sont plus résistantes à froid qu'à chaud.

c. Rhéostats en charbon. — On peut employer des crayons en charbon, d'un diamètre plus ou moins grand, mais on n'en fait guère usage vu leur fragilité.

La résistivité des charbons ordinaires varie beaucoup, elle est de 2400 à 42000 microhms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$ pour le graphite, la résistivité du charbon de cornue est d'environ 66750 microhms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$; celle des charbons à lumière varie de 3000 à 7000 microhms $\frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}$.

M. J.-A. Fleming a procédé à des essais avec des crayons constitués par un mélange de graphite et d'argile fabriqués par M. James, Waterhouse, de Wakefield; ces crayons avaient une résistance extraordinaire, mais, vu le peu d'homogénéité du mélange, elle était

très variable. Avec un mélange ayant 15 pour 100 de graphite, des crayons de 20^{cm} de longueur et de $1^{cm},2$ de diamètre, avaient des résistances variant de 603 Ω à 2630 Ω, quoique étant de même fabrication.

d. Rhéostats métalliques. — Dans les rhéostats que l'on emploie pour les essais, on peut naturellement admettre une augmentation de température beaucoup plus élevée que dans les rhéostats ordinaires; on n'est en somme limité que par le danger de voir le rhéostat s'abîmer par suite soit de fusion, soit d'oxydation rapide du fil.

Quand on connaît l'intensité admissible pour un fil de métal donné ayant un diamètre connu et placé dans des conditions de refroidissement données, on peut déterminer, très approximativement, l'intensité admissible dans un fil de diamètre quelconque du même métal placé dans des conditions de refroidissement identiques.

La température du métal ne variant pas, sa résistivité reste constante.

Si I est l'intensité du courant, d le diamètre, r la résistance du fil par unité de longueur, la chaleur développée est proportionnelle à $r\text{I}^2$, la résistance étant constante est proportionnelle à $\frac{\text{I}^2}{d^2}$.

D'autre part la surface de refroidissement est proportionnelle à d. Pour être toujours dans les mêmes conditions, il suffira d'avoir

$$\frac{\text{I}^2}{d^2} = k_1 d, \qquad \text{I} = \sqrt{k_1}\, d^{\frac{3}{2}} = k\, d^{\frac{3}{2}},$$

k étant une constante dépendant de la nature du métal et du mode de refroidissement; c'est l'intensité du courant pour le fil ayant un diamètre égal à l'unité. Quand on connaît la valeur de I pour un diamètre donné d, on peut en déduire la valeur de k.

La longueur du fil de diamètre donné à employer est proportionnelle à la différence de potentiel. Pour une différence de potentiel donnée, la longueur l du fil pour un diamètre donné (et par conséquent une intensité donnée), peut se déduire du résultat d'un essai (dans lequel on a l pour un diamètre d et une intensité donnée) de la manière suivante.

On doit avoir

$$r\text{I} = \text{E};$$

or, r est proportionnel à $\frac{l}{d^2}$ et I à $d^{\frac{3}{2}}$, on aura donc

$$l\,\frac{d^{\frac{3}{2}}}{d^2} = \text{const.},$$

d'où

$$l = k_1\,d^{\frac{1}{2}}.$$

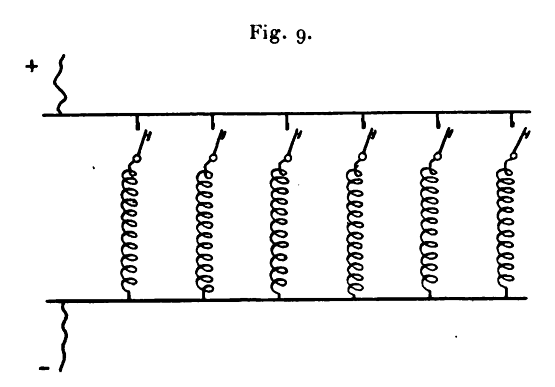
Ayant déterminé dans des conditions données, la valeur de l, pour un diamètre d, donné, on peut en déduire la valeur de k_1 qui est la longueur que doit avoir un fil dont le diamètre est égal à l'unité pour la d. d. p. voulue.

La Table I, à la fin du Volume, donne les valeurs de $d^{\frac{1}{2}}$ et $d^{\frac{3}{2}}$ pour des valeurs de d variant de 0,1 à 10.

A partir d'une certaine section, il est plus avantageux d'employer des bandes minces que des fils.

La surface de refroidissement par unité de longueur est pour une bande $2\left(e + \frac{s}{e}\right)$ et pour un fil $3,54\sqrt{s}$, s étant la section et e l'épaisseur de la bande. Au moyen de ces relations, on peut dans chaque cas savoir quel est le plus avantageux au point de vue du refroidissement. L'épaisseur des bandes peut être de $0^{mm},5$ et même $0^{mm},3$.

Fig. 9.



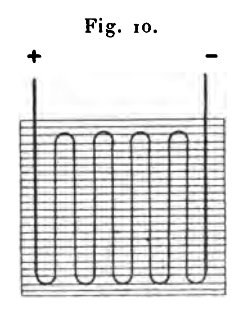
Quand on a un grand nombre d'essais à faire, par exemple dans un laboratoire, on peut fabriquer les rhéostats avec des métaux ayant une grande résistivité en même temps qu'un faible coefficient d'augmentation de la résistance avec la température, tels que la rhéostatine, la nickeline, la kruppine, etc. Les fournisseurs de ces

métaux donnent toutes les indications nécessaires pour la fabrication de ces rhéostats.

Les rhéostats peuvent avoir la forme ordinaire, avec touches de réglage. Quand on a un grand nombre d'essais à faire sous une tension donnée, on peut monter entre deux barres générales, des résistances constituées par des boudins métalliques de divers diamètres, chacune de ces résistances étant munie d'un interrupteur (*fig.* 9). En intercalant plus ou moins de résistances appropriées, on peut faire varier à volonté l'intensité du courant.

La Société *La Rhéostatine* construit des résistances très commodes à employer dans des essais, vu le peu de place qu'elles occupent. Ces résistances sont constituées par un fil contourné et formant la chaîne d'une sorte de tissu dont la trame est formée de

Fig. 10.



fils d'amiante (*fig.* 10). Cette disposition assure un très bon refroidissement et permet de constituer de grandes résistances sous un faible volume.

Quand on a à faire des essais dans des usines éloignées, où l'on ne peut transporter des rhéostats, il est souvent économique de constituer les résistances par des fils de fer, qui peuvent être disposés dans l'air ou être refroidis par de l'eau.

Dans un essai d'une dynamo à 220 v. nous avons eu à notre disposition du fil de 5^{mm} de diamètre pour constituer les résistances à employer.

Après divers essais, nous avons adopté une longueur de 175^{m}; l'intensité du courant, le régime établi, était de 120 a. (sous 220 v.). Le fil était supporté par des isolateurs et des poulies en porcelaine, et par des planches avec interposition d'une forte épaisseur de papier d'amiante, car le bois se carbonisait au contact du fil. Il a fallu prendre

des dispositions spéciales pour empêcher les contacts entre les divers fils, car ceux-ci s'allongeaient beaucoup par suite de l'échauffement.

Comme pour $d = 5$ on a $d^{\frac{3}{2}} = 11,18$ (*voir* p. 19)

$$k = \frac{I}{d^{\frac{3}{2}}} = \frac{120}{11,18} = 10,2.$$

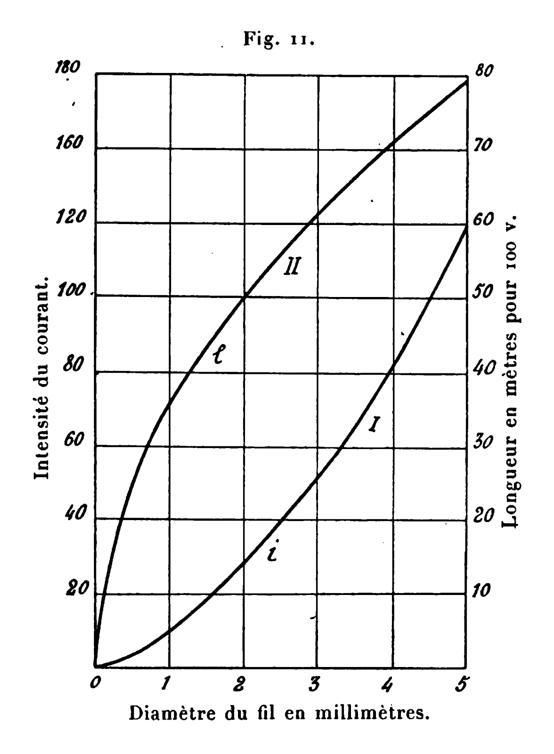
On a donc $I = 10,2\, d^{\frac{3}{2}}$.

Pour 100 v. la longueur est

$$\frac{175}{220} = 79^{m},5$$

$$d^{\frac{1}{2}} = 2,24. \qquad k_1 = \frac{79,5}{2,24} = 35^{m},5$$

Fig. 11.



Pour 100 v. on a donc :

$$l = 35,5\, d^{\frac{1}{2}}.$$

La figure 11 donne la longueur du fil en mètres (courbe II) sous une tension de 100 v. et l'intensité du courant en a. (courbe I) pour des fils de fer suspendus dans l'air.

La résistance du fil chaud de 175^m était :

$$r = \frac{e}{I} = \frac{220}{120} = 1,833\,\Omega.$$

La résistance par mètre et par millimètre carré de section était :

$$\rho = \frac{rs}{l} = \frac{1,833 \times 19,64}{175} = 0,206\,\Omega.$$

En admettant pour le fer à 0°

$$\rho = 0,096\,\Omega,$$

le rapport est :

$$\frac{0,205}{0,096} = 2,13.$$

En admettant que le coefficient d'augmentation de résistance par degré soit resté constant, la température du fil a atteint :

$$\frac{2,13}{0,0063} = 340°.$$

On peut arriver, en disposant les fils dans l'eau, à augmenter de beaucoup la densité admissible, le refroidissement étant alors plus grand. On a besoin alors d'une longueur de fil bien moins considérable.

Lors des essais de réception de l'usine d'Engins ([1]), MM. Mauduit et Routin ont employé un rhéostat en fer constitué de la manière suivante : 3 plaques de tôle de $0^{mm},5$ d'épaisseur ont été découpées de façon à ne pas interrompre leur continuité, en bandes de 90^{mm} de largeur. On forma ainsi trois bandes de 17^m de longueur qui furent reliées à une de leurs extrémités (pour avoir un centre d'étoile pour le courant triphasé) et maintenues à 50^{cm} les unes des autres par des traverses en planches. Le tout fut noyé dans le canal de fuite de l'usine et maintenu en place par de grosses pierres.

L'intensité du courant par phase était de 1540 a. et la tension

([1]) Voir *l'Éclairage électrique;* 6 octobre 1900.

composée de 132 v., de sorte que la différence de potentiel entre les deux extrémités d'une bande était de $\frac{132}{1,732} = 76,2$ v.

La section d'une bande était de $0,5 \times 90 = 45^{mm^2}$, et la densité du courant de $\frac{1540}{45} = 34,2$ a. par millimètre carré.

La résistance ohmique, en admettant l'induction négligeable, était :

$$r = \frac{76,2}{1540} = 0,047\,\Omega.$$

La longueur était de 17^m et la section de 45^{mm^2}, on avait donc :

$$\rho = \frac{0,047 \times 45}{17} = 0,124\,\Omega.$$

L'augmentation de résistance était $\frac{0,124}{0,096} = 1,3$ et la température de $\frac{1,3}{0,0063} = 206^\circ$ environ.

M. Park-Ruckers (¹) a fait de nombreux essais avec des rhéostats en fil de fer immergé dans l'eau; il donne la description ci-dessous d'un tel rhéostat qu'il a pu employer avec succès.

Un baril d'eau de $154^l,4$ est divisé en deux compartiments par une cloison verticale en bois; chacun de ces deux compartiments est divisé par des cloisons en planches, en compartiments plus petits de section carrée de $7^{cm},6$ de côté.

On obtient ainsi des sortes de cheminées dans lesquelles l'eau peut circuler, la partie inférieure étant au-dessus du fond du tonneau et la partie supérieure au-dessous du niveau de l'eau.

Les résistances sont constituées par des boudins de $3^{cm},17$ de diamètre en fil de fer. La moitié d'une résistance était disposée dans une cheminée d'un des compartiments du baril, l'autre moitié dans une des cheminées de l'autre compartiment. Les extrémités de chacune des résistances sont donc séparées par la cloison divisant le baril en deux parties, afin d'éviter les effets d'électrolyse. Chacune des extrémités de chaque résistance est reliée par l'intermédiaire d'un fil de cuivre isolé de $2^{mm},91$ de diamètre, à l'un des pôles d'un interrupteur bipolaire. La jonction du fil de fer et du

(¹) *American Electrician;* février 1901.

fil de cuivre a lieu à une profondeur d'au moins $11^{cm},8$ au-dessous du niveau de l'eau.

Il y avait 7 résistances, constituées chacune par un fil de fer de $1^{mm},828$ de diamètre et $23^{m},47$ de longueur, placées chacune dans deux cheminées de part et d'autre de la cloison médiane. Les deux autres cheminées (une de chaque côté de la cloison) étaient occupées par une résistance de $1^{mm},024$ de diamètre. Dans les espaces ouverts était disposée une résistance de $24^{m},38$ de longueur, constituée par du fil de fer de $2^{mm},052$ de diamètre.

M. Park Ruckers a pu maintenir pendant 10 heures, au moyen de ce rhéostat, un courant de 800 a. sous 230 v., c'est-à-dire absorber 247 chevaux, sans avoir trace de détérioration des résistances. Le refroidissement était assuré par de l'eau provenant d'un robinet de $1^{cm},48$ de diamètre, alimenté par un réservoir placé à $4^{m},57$ au-dessus.

D'après les résultats de ces essais on a :

$$I = 49 d^{\frac{3}{2}},$$

$$l = 8 d^{\frac{1}{2}},$$

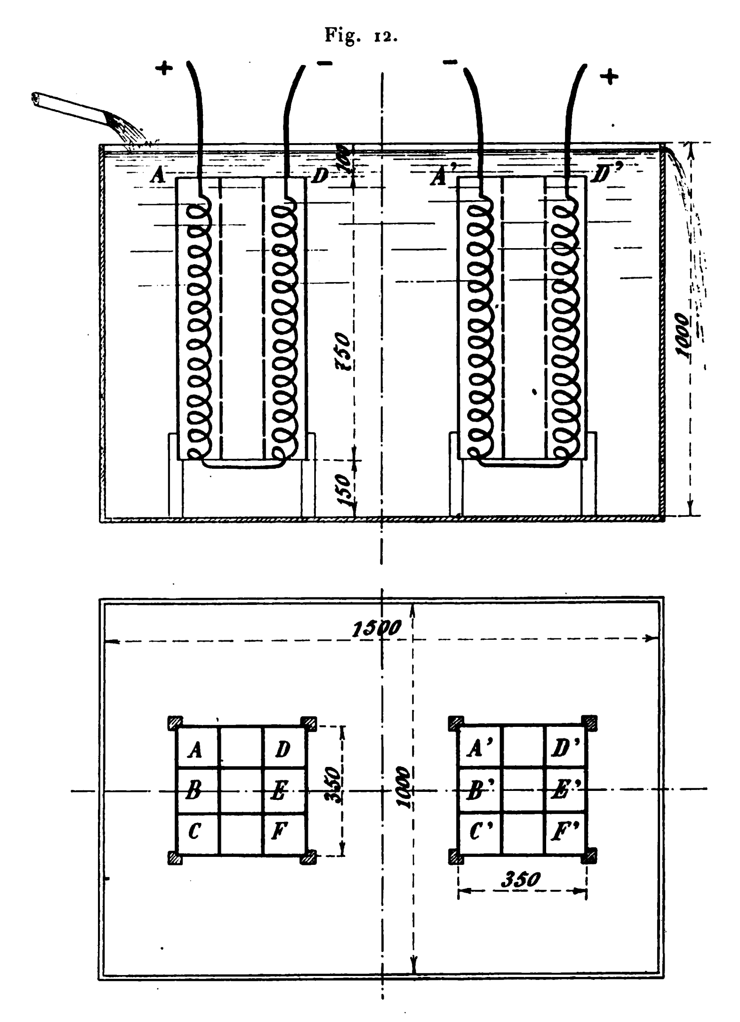
l étant la longueur en m pour 100 v.

On trouve $\rho = 0,208$, ce qui donne pour le fil une température de 340° environ.

Lors des essais d'une dynamo de 450 k. w. à 240 v., nous avons employé des résistances formées de fil de fer, refroidies d'après le procédé de M. Park Ruckers. Dans une grande cuve en bois, ayant une longueur de $1^{m},50$, une largeur et une profondeur de 1^{m} (*fig.* 12), nous avons installé deux caisses en planches cloisonnées. Ces caisses, de section carrée de $0^{m},35$ de côté et $0^{m},75$ de hauteur, étaient divisées par des cloisons, chacune en compartiments carrés de $0^{m},10$ de côté. La caisse reposait sur le fond de la cuve par l'intermédiaire de 4 pieds de $0^{m},15$ de hauteur; le rebord supérieur de la caisse était ainsi à $0^{m},10$ au-dessous du niveau de l'eau. Le diamètre des boudins de fil de fer était de $0^{m},07$ environ; l'extrémité de l'une des résistances était en A, l'autre en D, l'on avait ainsi par caisse 3 résistances AD, BE, CF et respectivement A'D', B'E', C'F'. Les caisses avaient été construites pour recevoir chacune 5 résistances.

la moitié de l'une d'elles devant être placée en dehors, mais on n'a pas eu besoin de toutes.

Fig. 12.



La question la plus délicate est la liaison de la résistance en fer avec le conducteur en cuivre amenant le courant. Nous avons d'abord employé du cuivre nu auquel était soudé le fil de fer; mais l'électrolyse du cuivre rendait l'eau conductrice et l'on avait électrolyse du fer. On a ensuite amené le courant par des câbles isolés; le joint a été fait à la manière ordinaire, en décapant une longueur d'en-

viron 7^{cm} à 8^{cm} du câble et en soudant le fil de fer au milieu des fils de cuivre. La partie dénudée du câble a été ensuite goudronnée puis recouverte de toile chatertonnée. Pour quelques-unes de ces résistances le ruban chatertonné recouvrait un peu le fil de fer; ces résistances ont sauté au point de jonction, dès leur mise en service. Le ruban chatertonné doit simplement recouvrir la partie dénudée du câble et dans ce cas le joint se comporte bien. Le joint doit être disposé dans la cheminée à quelques centimètres au-dessous du niveau supérieur de la caisse, de sorte qu'il est bien refroidi par le violent courant d'eau.

L'eau arrivait par une gouttière à l'une des extrémités de la cuve et s'échappait par le rebord opposé légèrement entaillé.

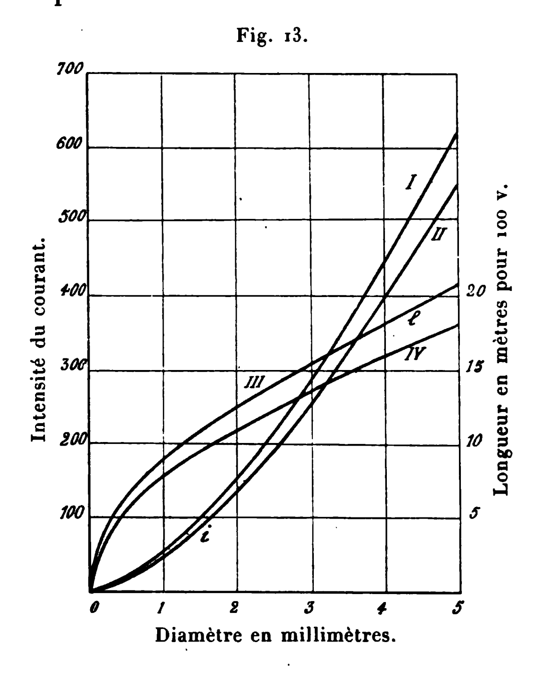
On a employé pour constituer les résistances deux sortes de fil de fer (les seules que nous ayons pu avoir à notre disposition); les unes de 26^{m} de longueur étaient constituées par du fil de fer ordinaire de 2^{mm} de diamètre, les autres de 35^{m} de longueur étaient constituées par du fil de fer galvanisé de 3^{mm} de diamètre. Les deux extrémités de chaque résistance étaient enroulées de manière à former chacune une sorte de ressort à boudin, de 7^{cm} de diamètre, et l'on soudait alors les câbles d'amenée. On introduisait chacune des extrémités à la partie inférieure dans la cheminée correspondante et l'on tirait par le haut, de manière à écarter les spires des boudins.

Pendant toute la durée de l'essai en charge de 12 heures et les essais de variation de charge, les résistances se sont très bien comportées (une seule a sauté presque immédiatement après la mise en service, mais cela provenait d'un défaut dans le fer) et nous n'avons pas eu de variation d'intensité. Sous 240 v. l'intensité dans les résistances de 2^{mm} était de 130 a. en moyenne et dans celles de 3^{mm} de 290 a. en moyenne. Pendant toute la durée des essais, la circulation de l'eau a été établie de manière qu'elle s'échappe à 60°; comme on le verra plus loin, on aurait pu employer beaucoup moins d'eau.

L'eau employée provenait d'un marais et contenait beaucoup de matières organiques; nous n'avons pas constaté cependant d'attaque du fer, quoique pendant la nuit qui s'est écoulée entre les essais de charge et ceux de variation de charge, les cuves se soient complètement vidées. Il y avait un dépôt brun pulvérulent sur les premières spires des résistances du côté du pôle négatif. Pour les caisses dans

lesquelles les trois résistances fonctionnaient simultanément nous avons employé des interrupteurs unipolaires. Pour les résistances destinées à achever le réglage disposées dans une caisse spéciale, et ne fonctionnant pas toutes simultanément, on a employé des interrupteurs bipolaires.

Fig. 13.



D'après les données qui précèdent, pour le fil de 2^{mm} de diamètre (130 a. sous 240 v. avec une longueur de 38^m), on a

$$k = \frac{130}{2,83} = 46,$$

$$k_1 = \frac{26}{240} 100 \times \frac{1}{1,41} = 7,66.$$

On a donc

$$I = 46\, d^{\frac{3}{2}}, \qquad l = 7,66\, d^{\frac{1}{2}}.$$

Pour le fil de 3^{mm} (290 a. sous 240 v. avec une longueur de 38^m), on a

$$k = \frac{290}{5,20} = 55,5, \qquad k_1 = \frac{38}{240} \times 100 \times \frac{1}{1,73} = 9,1,$$

$$I = 55,5\, d^{\frac{3}{2}}, \qquad l = 9,1\, d^{\frac{1}{2}}.$$

Pour le fer employé pour les résistances de 3^{mm}, les coefficients diffèrent de ceux de M. Park-Ruckers. Dans chaque cas, il faut procéder à des essais préalables et les divers coefficients donnés ci-dessus permettent de déterminer approximativement la longueur à employer.

Les courbes I et III (*fig.* 13) donnent respectivement la longueur (sous 100 v.) et l'intensité du courant pour le fer correspondant à celui de 3^{mm} de diamètre; les courbes II et IV se rapportent aux essais de M. Park-Ruckers.

Afin de nous rendre compte de la quantité d'eau réellement nécessaire pour le refroidissement, nous avons, après les essais, fait fonctionner une résistance de 3^{mm} sans renouveler l'eau de la caisse. Au commencement, le courant d'eau qui s'établit dans les cheminées, produisait au-dessus de chacune d'elles une dénivellation de 1^{cm} environ, et au fur et à mesure que l'eau s'échauffait cette dénivellation augmentait. Au bout de 2 heures et demie de fonctionnement, l'eau, à l'extrémité de la caisse opposée à la résistance, avait atteint la température de 90°. Voyant que la rupture de la résistance ne se produirait qu'après l'évaporation d'une certaine quantité d'eau, nous avons, pour aller plus vite, percé un petit trou à la partie inférieure de la cuve pour faire écouler l'eau.

Au fur et à mesure que l'eau baissait dans la grande cuve, la projection d'eau au-dessus des cheminées occupées par la résistance augmentait de hauteur, et, quand l'eau de la cuve a été au niveau du rebord supérieur de la caisse cloisonnée, l'eau était projetée à 30^{cm} environ de hauteur. Puis le niveau de l'eau baissant dans la caisse, la hauteur de projection de l'eau a diminué; quand le niveau de l'eau dans la cuve a été d'environ 20^{cm} au-dessous de la partie supérieure de la caisse cloisonnée, il n'y eut plus circulation d'eau, de grosses gouttes d'eau étaient projetées dans les cheminées et y retombaient, en même temps qu'il y avait un fort dégagement de vapeur. La résistance ne s'est rompue que quand le niveau de l'eau dans la caisse a été à $0^{m},35$ au-dessous de la partie supérieure de la caisse cloisonnée.

On voit, d'après le résultat de cet essai, qu'il n'est pas nécessaire d'employer une grande quantité d'eau et que l'on peut se contenter de remplacer l'eau vaporisée.

e. Bobines à réaction. — Dans les essais des machines à courant

alternatif on a souvent à produire des charges inductives, c'est-à-dire avec un facteur de puissance très faible; on se sert alors de bobines à réaction. Ces bobines sont enroulées de fil de forte section, afin d'avoir une résistance ohmique très faible, l'enroulement se fait sur une carcasse en bois ou en carton et à l'intérieur on dispose un faisceau de fils de fer de faible diamètre formant noyau. Le noyau peut s'enfoncer plus ou moins dans la bobine, de manière à faire varier le coefficient de self-induction. Pour le cas de courants triphasés, on dispose trois bobines identiques à côté les unes des autres et les trois noyaux sont reliés de manière à pouvoir être enfoncés ou retirés simultanément.

MISE EN CHARGE DES MOTEURS.

On peut naturellement faire commander par le moteur une (ou plusieurs) génératrice dont on connaît au besoin le rendement, et faire varier la charge de cette génératrice.

On peut également employer un frein d'absorption ([1]), soit un frein de Prony, soit un frein à corde avec peson (ce genre de frein est particulièrement à recommander pour des essais de longue durée). Pour des moteurs de faible puissance (jusqu'à 4 ou 5 kilowatts), on peut employer le frein Raffard ou le frein Maréchal ([2]); les freins magnétiques ([3]) sont également très commodes. Ces derniers freins, d'invention récente, dont l'usage se répand de plus en plus, sont basés sur le principe suivant : On relie l'arbre du moteur à essayer à un arbre portant un disque métallique, qui tourne dans le champ d'électro-aimants. L'ensemble des électro-aimants est mobile autour de l'axe du disque, et l'effort d'entraînement exercé par les courants induits dans le disque sur les électro-aimants est équilibré comme dans les freins ordinaires par un poids agissant à l'extrémité du levier. Le grand avantage des freins de ce système est que le réglage de la charge en est très facile et peut s'effectuer d'un point quel-

---

([1]) *Voir,* au sujet des freins, MONTPELLIER et ALIAMET, *Essais industriels.* — J. BUCHETTI, *Guide pour l'essai des machines.* — R.-H. THURSTON, *Traité de la machine à vapeur.* — AIMÉ WITZ, *Traité théorique et pratique des moteurs à gaz.* — *Elektrotechnische Zeitschrift* du 18 avril 1901.

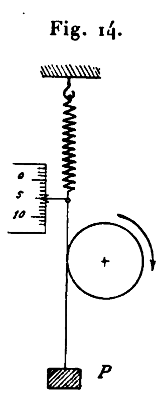
([2]) *L'éclairage électrique,* t. XI, p. 110.

([3]) Voir *Éclairage électrique,* t. XVII, p. 203; t. XXIV, p. 232. *Elektrotechnische Zeitschrift,* 6 avril 1900, 28 février 1901, 25 juillet 1901.

conque, car il suffit de faire varier au moyen d'un rhéostat l'intensité du courant d'excitation des électro-aimants. On peut, par exemple, disposer le frein, de manière que, lorsque l'équilibre n'est pas établi, un contact ferme le circuit d'une sonnerie (il y a naturellement à établir deux contacts, l'un au-dessous, l'autre au-dessus de la position d'équilibre du levier). Le tachymètre et les appareils de mesure sont disposés à proximité du rhéostat d'excitation des électro-aimants, de sorte qu'un seul observateur peut faire rapidement tous les relevés.

Pour de très petits moteurs, on peut employer un petit frein à ficelle avec ressort (*fig.* 14) auquel est fixé un petit index se dé-

Fig. 14.



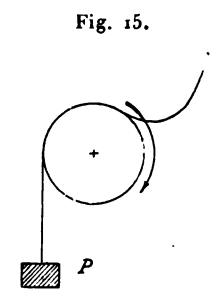
plaçant devant une graduation; on étalonne le ressort de manière à déterminer l'effort correspondant à un allongement indiqué sur la graduation. La ficelle bien graissée est attachée à la partie inférieure du ressort et fait un tour ou deux sur la poulie, munie à cet effet d'une gorge; à l'extrémité libre de la ficelle est attaché le poids agissant P.

Pour des essais rapides de petits moteurs, on peut employer un poids P attaché à l'extrémité d'une lanière (*fig.* 15); on tient l'autre extrémité de cette lanière à la main et on l'enroule plus ou moins sur la poulie, de manière que le brin tenu à la main flotte; avec un peu d'habitude on arrive très bien à manier ce frein.

On peut également disposer à l'extrémité d'une petite ficelle un poids P, à l'autre extrémité un poids plus faible p, et disposer la ficelle dans une gorge de la poulie. En choisissant convenablement

le rapport des poids et en enduisant la ficelle de plombagine, ce frein, dont le poids agissant est $P - p$, peut arriver à très bien conserver son équilibre. Il peut être employé dans les essais d'amortissement pour déterminer les constantes (*voir* p. 9).

Fig. 15.



Si P est le poids agissant en kilogrammes (poids diminué de l'indication du peson au besoin), l la longueur du bras de levier en mètre (dans les freins à corde l est le rayon de la poulie augmenté au besoin de la moitié du diamètre de la corde) et N le t/m., la puissance est exprimée par les relations

$$P_w = 1{,}0273\ P l N \text{ en watts,}$$
$$P_k = 0{,}1047\ P l N \text{ en kilogrammètres,}$$
$$P_c = 0{,}0014\ P l N \text{ en chevaux.}$$

Inversement, si le bras de levier, la puissance et le t/m. sont donnés, le poids sera déterminé au moyen des relations

$$P = 0{,}97 \frac{P_w}{N l}, \quad P_w \text{ étant exprimé en watts,}$$
$$P = 9{,}55 \frac{P_k}{N l}, \quad P_k \text{ étant exprimé en k. g. m.,}$$
$$P = 714{,}3 \frac{P_c}{N l}, \quad P_c \text{ étant exprimé en chevaux.}$$

CHAPITRE II.

MÉTHODES GÉNÉRALES D'ESSAIS.

§ 1. — Essais permettant de se rendre compte de la qualité de la construction.

Ces essais consistent principalement à vérifier si les divers circuits sont bien isolés soit de la masse, soit entre eux et à constater qu'après une durée de fonctionnement à pleine charge donnée, la température n'atteint en aucun point une valeur dangereuse.

Dans quelques cas on prescrit également des essais de fonctionnement avec une surcharge déterminée pendant un certain temps.

VÉRIFICATION DE L'ISOLEMENT DES ENROULEMENTS.

On s'est contenté pendant longtemps de mesurer la résistance d'isolement des divers circuits soit à la masse, soit entre eux, en employant autant que possible une tension au moins égale à la tension de service. Ces mesures se font soit à l'ohmmètre, soit en employant une bobine de résistance de comparaison.

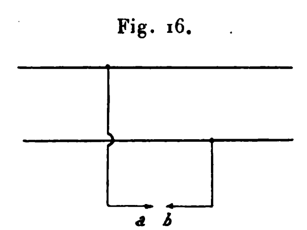
Ces essais sont peu concluants et souvent un enroulement, présentant une résistance d'isolement très élevée, est détruit lors d'une augmentation de tension relativement faible. Aujourd'hui on renonce à faire des essais de résistance d'isolement ou tout au moins on les complète par des essais à une tension plus élevée que la tension normale. Dans les mesures de résistance d'isolement, on trouve des valeurs très variables avec la tension employée, la résistance diminuant quand la tension augmente. On trouve également une grande

différence entre les mesures faites à froid ou à chaud (c'est-à-dire quand la machine a fonctionné un certain temps). Sur une machine sortant de l'atelier, nous avons mesuré une résistance d'isolement à froid de 3480000 Ω; après un fonctionnement à pleine charge de 6 heures, l'isolement (mesuré sous la même tension) n'était plus que de 252000 Ω; les différences sont moins grandes dans le cas d'une machine déjà en service depuis quelque temps, cependant la résistance à chaud peut être quatre à cinq fois moins forte qu'à froid.

Pour les essais de résistance des enroulements à une tension plus élevée que la tension normale, on emploie ordinairement du courant alternatif à cause de sa facilité de transformation. La tension d'essai se mesure à l'aide d'un v. m. qui donne la tension efficace.

Dans un essai, c'est évidemment la tension maximum qu'il importe de connaître; dans le cas de courant sinusoïdal, la tension maximum est 1,42 fois la tension efficace, mais naturellement, quand le courant n'est pas exactement sinusoïdal, le rapport dépend de la forme de la courbe, et il peut être plus élevé. Pour obvier à cette difficulté, au lieu d'employer un v. m. pour mesurer la tension, on peut disposer en dérivation (*fig.* 16) deux pointes d'aiguilles séparées par un

Fig. 16.



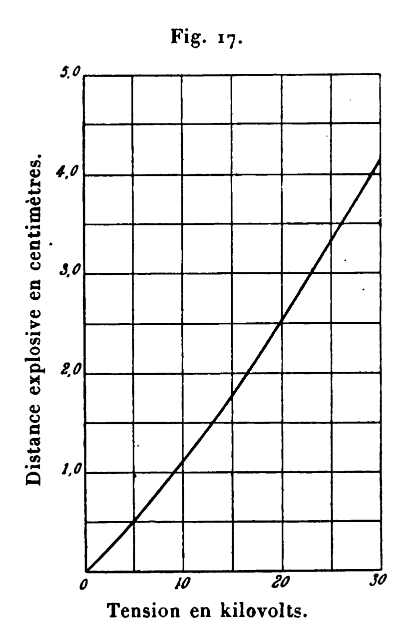
intervalle d'air ab, égal à la distance explosive, correspondant pour un courant sinusoïdal à la tension voulue. On fait alors monter la tension jusqu'à ce que l'étincelle jaillisse entre les deux pointes. Le Tableau suivant extrait du Règlement sur les essais de machines, adopté en 1899 par l'Institut des ingénieurs électriciens américains (1), donne les distances explosives pour un courant sinusoïdal.

(1) *L'Éclairage électrique;* 21 octobre 1899.

Tension efficace en kilovolts.	Distance explosive en centimètres.	Tension efficace en kilovolts.	Distance explosive en centimètres.	Tension efficace en kilovolts.	Distance explosive en centimètres.
5	0,57	40	6,20	100	24,4
10	1,19	45	7,50	110	27,3
15	1,84	50	9,00	120	30,1
20	2,54	60	11,8	130	32,9
25	3,30	70	14,9	140	35,4
30	4,10	80	18,0	150	38,1
35	5,10	90	21,2		

La courbe de la figure 17 est la reproduction de ce tableau, elle peut servir pour des tensions atteignant 30 kilovolts (30000 volts).

Fig. 17.



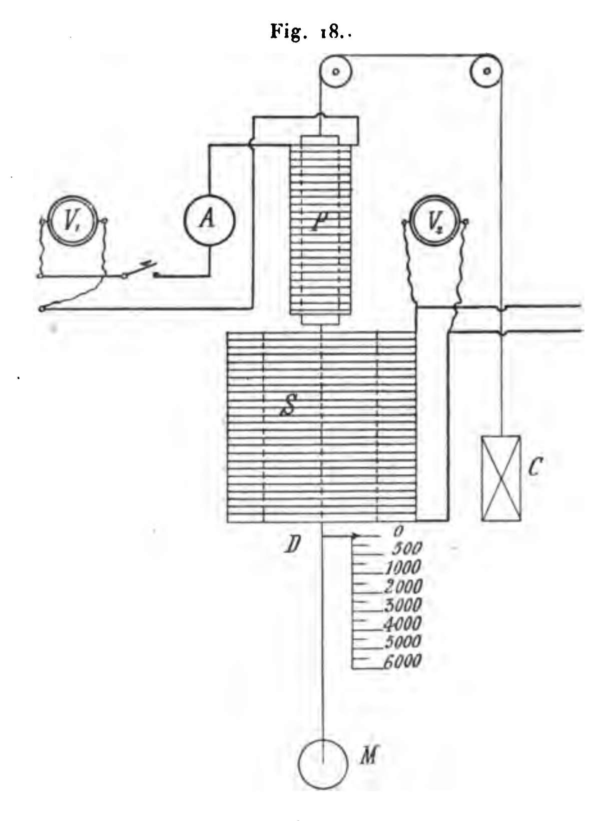
On peut, si l'on dispose d'un alternateur spécial, augmenter l'excitation jusqu'à ce que la tension voulue pour l'essai soit atteinte, soit directement, soit dans le secondaire d'un transformateur élévateur de tension.

Quand on n'a à sa disposition qu'une source d'électricité de tension constante (courant d'un secteur par exemple), on peut employer un transformateur élévateur de tension, ayant son enroulement à haute

tension divisé en plusieurs parties aboutissant à des bornes; on peut ainsi obtenir la tension voulue, en se branchant aux bornes voulues.

En Amérique, on emploie un transformateur dans lequel la variation de tension est obtenue en déplaçant le circuit primaire (à basse tension) par rapport au circuit secondaire fixe (*fig.* 18). Le

Fig. 18.



secondaire est constitué par une bobine fixe S, dans laquelle peut se déplacer la bobine primaire P, suspendue et soumise à l'action d'un poids C. En agissant sur une manivelle M on fait pénétrer plus ou moins la bobine P dans la bobine S, de sorte qu'un plus ou moins grand nombre de spires de cette dernière deviennent actives et que l'on peut régler la tension.

Dans le circuit primaire sont disposés un interrupteur, un v. m. V_1, un a. m. A et un fusible, dans le secondaire un v. m. V_2 (ou des pointes d'aiguilles comme il est indiqué ci-dessus), de manière à

pouvoir déterminer la tension, qui peut être également indiquée après étalonnement par un index relié à la bobine primaire se déplaçant devant une graduation.

Quand on dispose l'enroulement à essayer directement dans le circuit d'essai à haute tension, dès que l'isolant saute, le courant, avant que le fusible du primaire ne fonde, prend une grande intensité et la bobine peut être détériorée complètement.

Pour remédier à cet inconvénient, on peut intercaler dans le circuit des lampes à incandescence disposées en série, dont le nombre correspond à la tension que l'on veut obtenir. Le circuit se termine par deux poignées isolées munies de pointes, que l'on applique sur les deux points entre lesquels on veut vérifier l'isolement. Avant de commencer l'essai on réunit les deux pointes et les lampes s'allument. Tant que l'isolant à essayer résiste, les lampes restent éteintes; on est averti de la rupture de l'isolant par l'allumage des lampes, mais alors l'intensité du courant ne peut prendre une valeur suffisante pour endommager complètement la bobine, de sorte qu'il suffit de réparer le point défectueux. Ordinairement la rupture de l'isolant ne se produit que 30 secondes ou 40 secondes après l'application de la haute tension; il faut donc appliquer la tension pendant une minute au moins.

Au lieu d'appliquer une tension relativement très élevée ([1]), on peut appliquer une tension moindre (quoique dépassant toujours la tension normale), mais pendant un temps assez long, une demi-heure par exemple, la machine ayant atteint sa température maximum.

Dans certains cas, pour les dynamos, si l'on peut sans danger les faire tourner à une vitesse beaucoup plus grande que leur vitesse normale, on peut obtenir la tension d'essai de la machine à essayer elle-même.

DÉTERMINATION DE L'AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE.

L'énergie dissipée dans une machine par suite des frottements, de la résistance des enroulements, de l'hystérésis, des courants de

---

([1]) Comparer à ce sujet les règlements de l'Institut des ingénieurs électriciens américains et de l'Association des électrotechniciens allemands, qui sont reproduits à la fin du Volume.



Foucault, etc., se transforme en chaleur de sorte que la température de ses diverses parties tend à augmenter; d'un autre côté, la machine tend à se refroidir, tant par conductibilité que par rayonnement et convexion, et le refroidissement augmente au fur et à mesure que la température de ses diverses parties augmente (les conditions dans lesquelles elle est placée restant identiques), de sorte qu'au bout d'un temps plus ou moins long, la température des diverses parties prend une valeur pratiquement fixe, qui est la température de régime. La température de régime des diverses parties de la machine dépend de la charge (les pertes augmentant avec la charge) et des conditions de refroidissement. Naturellement si la durée de fonctionnement de la machine n'est pas assez longue pour que le régime permanent soit établi, la température atteinte est inférieure à la température de régime.

La température est intimement liée au rendement, et, toutes choses égales d'ailleurs, diminue quand celui-ci augmente. Plus les dimensions d'une machine d'un type donné sont grandes, meilleur doit être le rendement pour que la température finale ne dépasse pas une certaine valeur.

Pour qu'une machine puisse faire un service prolongé, il faut que la température des diverses parties ne dépasse pas certaines valeurs. Une température trop élevée peut avoir deux inconvénients : 1° entraîner la destruction des isolants; 2° provoquer le phénomène que l'on désigne sous le nom de *vieillissement des tôles;* celles-ci perdant de leurs propriétés magnétiques, les pertes par hystérésis augmentent dans de grandes proportions, de là diminution du rendemement, surélévation de température, etc.

La température maximum admissible dépend naturellement de la nature des isolants (*voir* à ce sujet les règlements américain et allemand à la fin du Volume); elle peut être très élevée pour des isolants au mica et au papier, tandis que, dans les isolants au coton, les substances imprégnant le coton peuvent être rapidement détériorées à haute température (la gomme laque, par exemple, se détériore déjà vers 90°).

L'action du vieillissement des tôles est très importante dans les transformateurs, car alors les pertes à vide (qui dans certains cas entrent comme facteur important dans les frais d'exploitation) augmentent rapidement; il semble que l'on doive limiter à 80° la tem-

pérature maximum que doit pouvoir atteindre un transformateur.

La température aux divers endroits d'une même partie d'une bobine n'est pas uniforme. Certaines parties sont à une température plus élevée que d'autres ([1]).

On ne peut pas toujours procéder aux essais, la machine étant sur son lieu d'emploi et dans les conditions normales de fonctionnement, aussi ne détermine-t-on généralement pas la température absolue des diverses pièces, mais seulement l'élévation de leur température au-dessus de celle de l'air ambiant. C'est cette élévation de température qui est ordinairement fixée par les cahiers des charges; on admet ainsi que l'élévation de température reste constante, quelle que soit la température ambiante, et même les conditions de refroidissement par conductibilité, ce qui n'est pas toujours absolument exact (*voir* à ce sujet le règlement américain).

Comme c'est en somme la température absolue qui ne doit pas atteindre une certaine valeur, l'élévation de température admissible dépend des conditions d'emploi de la machine. On pourra admettre une élévation de température plus élevée pour une machine destinée à fonctionner dans un endroit frais et bien ventilé que pour une machine destinée à fonctionner dans un endroit où la température est élevée (une chaufferie de navire, par exemple). L'élévation de température doit être mesurée quand la machine a fonctionné à pleine charge, pendant un temps correspondant à la plus longue durée de son fonctionnement en service; si alors la machine n'a pas atteint le régime permanent de température, ou quand ce régime est atteint, si la durée du fonctionnement en service est plus longue (*voir* à ce sujet le règlement allemand).

La durée du fonctionnement nécessaire pour atteindre le régime permanent dépend de la puissance de la machine, de ses dimensions, de sa vitesse, etc.; elle est très variable.

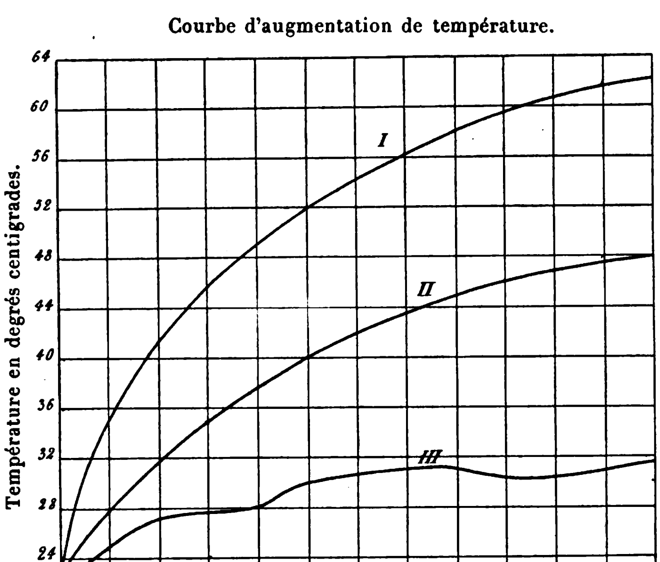
Les courbes de la figure 19 se rapportent à une dynamo de 450 k.w., 240 v., 60 t/m., la courbe I donne la température moyenne de l'enroulement inducteur en fonction du temps de fonctionnement (la température ayant été mesurée par l'augmentation de résistance), la courbe II donne les indications d'un thermomètre, placé sur le fer de l'inducteur, à l'angle d'une des joues des bobines, et la courbe III

([1]) *Electrical World and Engineer,* 13 juillet 1901.

donne les indications d'un thermomètre placé dans la salle. On voit que le régime permanent de température n'a été atteint qu'au bout de 12 heures environ. Dans des essais de moteur de 44^{chx} à 220 v. 600 t/m. la température de régime a été atteinte en 5 heures.

Fig. 19.

Courbe d'augmentation de température.



Heures de fonctionnement.

Comme en général le régime est plus long à s'établir dans la partie fixe d'une machine que dans sa partie mobile mieux ventilée, on peut se rendre compte du moment où le régime permanent est établi d'après les indications d'un thermomètre placé sur la partie fixe, à l'abri des courants d'air, ou en procédant à des mesures de résistance, du circuit inducteur par exemple. On peut également arrêter la machine de temps à autre, procéder à des mesures rapides de la température, soit au moyen du thermomètre, soit par la détermination de la résistance des circuits. Dans le cas de transformateur, on peut soit disposer un thermomètre sur la bobine, soit mesurer la température de l'huile s'il est à refroidissement d'huile, soit mesurer de temps à autre la résistance ohmique des enroulements en inter-

rompant le fonctionnement (il faut employer des thermomètres à alcool, et non à mercure, car les dérivations magnétiques peuvent induire des courants de Foucault dans le mercure et l'échauffer, ce qui naturellement fausse les indications).

La température de l'air ambiant est mesurée à l'aide d'un thermomètre suspendu dans la salle, abrité au besoin contre le rayonnement de la machine à vapeur. Le thermomètre doit indiquer la température du courant d'air régnant autour de la machine, au besoin on le place vers le milieu de cette dernière, à environ 1^m de distance. Pendant le dernier quart d'heure de marche de la machine, on relève les indications du thermomètre plusieurs fois à intervalles réguliers, et l'on prend comme température de l'air ambiant à la fin de l'essai la moyenne des lectures au thermomètre (*voir* à ce sujet le règlement allemand).

La détermination de la température des diverses parties de la machine peut se faire au moyen de thermomètres. Chaque appareil doit être bien gradué et étalonné au besoin; il est bon d'entourer la boule et la partie non utilisée de la graduation de papier d'étain. On place l'appareil bien à plat sur la partie dont on veut déterminer la température et l'on dispose par-dessus la portion non utilisée un tampon d'étoupe ou de déchets de coton. On serre le tout au moyen d'une ficelle, ou l'on place au besoin dessus des poids, car la durée des lectures peut être longue; on doit prendre en effet comme température l'indication du thermomètre quand il cesse de monter.

Pour les parties fixes de la machine, le maximum est assez rapidement atteint, tandis que pour les parties mobiles bien ventilées, par suite du refroidissement dû à la ventilation, les parties extérieures sont plus froides que les parties intérieures, et après l'arrêt il faut un certain temps pour que la chaleur se répartisse à la surface. Il en est de même pour les enroulements, même fixes, car les parties intérieures sont plus chaudes que les parties extérieures. La durée d'ascension du thermomètre est particulièrement grande pour les induits lisses, quand les pertes dans le fer sont un peu élevées; pour un moteur à courant continu de 110^{chx} sous 220 v. 300 t/m. à 4 pôles, après un fonctionnement à pleine charge de 6 heures, le maximum d'indication du thermomètre placé sur l'induit n'a été obtenu que 17 minutes après l'arrêt.

On ne peut employer que les thermomètres pour relever la tempé-

rature des paliers, bagues, collecteurs, etc., tandis que la température des enroulements peut être déterminée en mesurant leur résistance électrique à froid et à chaud.

La machine étant restée au repos un temps suffisamment long pour que l'on soit bien sûr que toutes ses parties sont à la température de l'air ambiant t_0 que l'on relève, on mesure la résistance r_0 de l'enroulement. Au moment où l'on veut mesurer la température finale T de l'enroulement, on mesure de nouveau sa résistance qui est alors r_1; si α est le coefficient d'augmentation de résistance du cuivre de l'enroulement par degré, on a :

$$r_1 = r_0[1 + \alpha(T - t_0)],$$

$$\frac{r_1}{r_0} = 1 + \alpha(T - t_0),$$

$$T = \frac{r_1 - r_0}{\alpha r_0} + t_0,$$

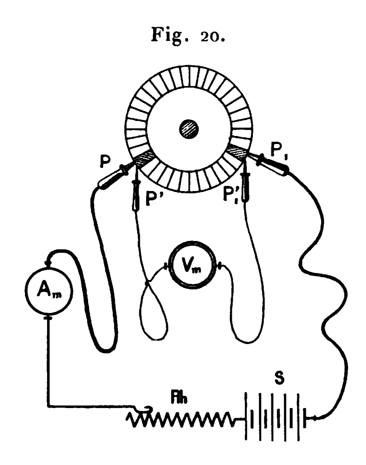
Si α n'est pas connu, on peut prendre comme valeur moyenne 0,004. La Table II, à la fin du volume, donne la valeur de $\frac{r_1}{r_0}$, pour des valeurs de $T - t_0$, allant de 1° à 60°. Elle permet de déterminer directement $T - t_0$, de la valeur $\frac{r_1}{r_0}$.

La méthode de mesure de la résistance est particulièrement commode pour la détermination de l'élévation de température des enroulements fixes. Pour les enroulements inducteurs fixes parcourus par un courant continu, en intercalant un v. m. entre les extrémités d'une ou plusieurs bobines (naturellement en dehors du rhéostat de réglage) et un a. m. dans le circuit, on peut déterminer la résistance à chaque instant. Dans le cas d'enroulements inducteurs mobiles, on ne peut faire de mesure en marche, par suite de la résistance de contact des balais sur les bagues, qui est très variable.

Dans le cas d'un induit avec collecteur, on peut mesurer la résistance entre deux lames, mais il faut avoir soin de marquer ces dernières, pour que l'on soit bien sûr de prendre toujours la résistance entre les mêmes points; la résistance des diverses bobines, principalement par suite des soudures, pouvant varier dans des limites assez grandes. La mesure de la résistance peut se faire au pont de Thomson, ou l'on peut employer le dispositif suivant (*fig.* 20). Les extrémités d'un circuit dans lequel est intercalée une source d'électricité

(quelques éléments d'accumulateurs par exemple), un a. m. sensible A_m et un rhéostat réglable, sont terminées par des tiges de cuivre à bout aplati, munies de poignées P et P_1 ; on appuie chacune des extrémités de ces tiges sur la lame du collecteur choisie. Les

Fig. 20.



extrémités du circuit d'un v. m. sont également terminées par des tiges munies de poignées P′ P′, que l'on appuie également chacune sur une des deux lames. En faisant varier l'intensité du courant au moyen du rhéostat, on procède à deux ou trois mesures et on prend la moyenne. Le même dispositif peut servir à déterminer la résistance d'un enroulement aboutissant à des bagues.

La température mesurée électriquement dans le cas d'enroulements fixes est plus élevée que celle mesurée au thermomètre et la différence peut atteindre 20 à 30 pour 100.

Pour des circuits mobiles, suivant le cas, l'une ou l'autre méthode peut donner une valeur supérieure, et l'on trouve généralement des différences peu importantes entre les deux déterminations. Les chiffres suivants ont été obtenus pour des induits lisses de moteurs à courant continu, la température calculée ($T - t_0 + t_1$, t_1 étant la température de l'air ambiant à l'arrêt) étant celle déduite des mesures de résistance; la résistance à chaud ayant été mesurée une minute après l'arrêt.

Température calculée.	Température mesurée.	
56°,7	54°,7	Moteur de 110 chx
56,0	54,0	id.
58,8	59,8	Moteur de 44
56,2	57,8	id.
60,0	58,8	id.
51,2	53,0	id.
59,0	53,3	id.

§ 2. — Essais de rendement.

On peut procéder dans certains cas à la mesure du rendement d'une machine par la *méthode directe,* c'est-à-dire par la détermination directe de la puissance mécanique ou électrique fournie à la machine et de la puissance mécanique ou électrique qu'elle restitue.

La puissance électrique peut toujours se mesurer par des relevés au moyen d'a. m., de v. m. et de w. m. Pour déterminer directement la puissance mécanique, on emploie des indicateurs (dans le cas de machines motrices à cylindres), des dynamomètres de transmission et des freins d'absorption.

Les dynamomètres de transmission ne peuvent guère être employés pour des puissances dépassant quelques k. w. et l'emploi des freins d'absorption devient délicat pour des puissances dépassant 100 à 150 k. w.

Pour certaines machines, telles que des moteurs-générateurs électriques, des commutatrices, des transformateurs, la méthode directe semble à première vue tout indiquée, mais cependant souvent on est obligé de recourir à d'autres méthodes, soit que la puissance à fournir soit trop élevée, soit que la méthode offre trop peu de précision. Au lieu de déterminer la puissance fournie à la machine et la puissance qu'elle restitue, on peut, dans certains cas, déterminer les pertes de puissance dans la machine. La méthode dite *des pertes séparées* est très employée; le point délicat est l'estimation exacte des pertes en charge.

Théoriquement ces pertes peuvent être déterminées par la *méthode calorimétrique,* en mesurant la chaleur dissipée dans la machine, mais en pratique cette méthode est inapplicable.

Quand on a, par un moyen quelconque, mesuré les pertes p dans une machine, si w est la puissance fournie, le rendement est

$$N = \frac{w}{w+p} = \frac{1}{1+\frac{p}{w}} \text{ dans le cas d'un moteur,}$$

$$N = \frac{w-p}{w} = 1 - \frac{p}{w} \text{ dans le cas d'une génératrice.}$$

Pour la même valeur de $\frac{p}{w}$, le rendement est plus élevé pour une génératrice que pour un moteur, et la différence est d'autant plus grande que $\frac{p}{w}$ a une valeur plus grande, comme le montre le Tableau suivant.

	Rendement	
Valeurs de $\frac{p}{w}$.	génératrice.	moteur.
0,05	0,952	0,950
0,10	0,909	0,900
0,15	0,869	0,850
0,20	0,833	0,800
0,25	0,800	0,750
0,30	0,769	0,700
0,35	0,741	0,650
0,40	0,714	0,600

On peut arriver à obtenir le rendement d'une machine par l'estimation des pertes, avec une précision aussi grande que par la méthode directe, tout en commettant dans l'estimation des pertes une erreur relative beaucoup plus considérable que dans les mesures directes.

Soient w la puissance recueillie aux bornes de la machine, w_1 la puissance qui lui est fournie et p les pertes. Supposons que l'on commette dans l'estimation de w_1 une erreur de $\frac{\alpha}{100}$ et dans l'estimation de p, une erreur de $\frac{\beta}{100}$.

Le rendement réel est

$$N = \frac{w}{w_1} = \frac{1}{1+\frac{p}{w}}.$$

Le rendement mesuré dans le cas de la méthode directe est :

$$N' = \frac{w}{w_1\left(1 \pm \frac{\alpha}{100}\right)} = \frac{w}{w_1} \times \frac{100}{100 \pm \alpha}.$$

L'erreur relative commise alors sur le rendement est :

$$\frac{N'}{N} = \frac{100}{100 \pm \alpha}.$$

Le rendement mesuré dans le cas d'emploi de la méthode des pertes séparées est :

$$N'' = \frac{1}{1 + \frac{p}{w}\left(1 \pm \frac{\beta}{100}\right)},$$

l'erreur relative est :

$$\frac{N''}{N} = \frac{1 + \frac{p}{w}}{1 + \frac{p}{w}\left(1 \pm \frac{\beta}{100}\right)} = \frac{100 + 100\frac{p}{w}}{100 + \frac{p}{w}(100 \pm \beta)}.$$

Pour que les erreurs relatives soient les mêmes, on doit avoir :

$$\frac{100}{100 \pm \alpha} = \frac{100 + 100\frac{p}{w}}{100 + \frac{p}{w}(100 \pm \beta)},$$

$$\beta = \alpha \frac{1 + \frac{p}{w}}{\frac{p}{w}}.$$

Il est facile de voir que plus les pertes relatives sont faibles, c'est-à-dire plus le rendement réel est élevé, plus β pourra différer de α. Ainsi, si l'on estime que l'on peut mesurer la puissance fournie à l'appareil à 1 pour 100 $\left(\frac{\alpha}{100} = 1\right)$, c'est-à-dire que le rendement peut être évalué à 1 pour 100 près : on devra avoir une approximation de β pour 100 dans l'évaluation des pertes séparées, les valeurs de β données par la relation :

$$\beta = \frac{1 + \frac{p}{w}}{\frac{p}{w}}$$

étant indiquées dans le Tableau suivant :

Rendement réel en pour cent.	Valeur de K $w_1 = Kw$.	Valeur de $\frac{p}{w} = K - 1$.	Valeurs de β.
40	2,500	1,500	1,67
50	2,000	1,000	2,00
60	1,667	0,667	2,50
70	1,429	0,429	3,33
80	1,250	0,250	5,00
85	1,176	0,176	6,68
90	1,111	0,111	10,00
92	1,087	0,087	12,50
94	1,064	0,064	16,62
95	1,053	0,053	19,82
96	1,042	0,042	24,81
97	1,031	0,031	33,26
98	1,020	0,020	51,00
99	1,010	0,010	101,00

On voit donc l'avantage de l'emploi de la méthode de l'estimation des pertes, quand la machine a un bon rendement.

Les pertes peuvent être estimées séparément; on peut également les mesurer en employant la *méthode d'opposition,* quand on dispose de deux machines identiques ; on les accouple électriquement et au besoin mécaniquement. L'une des machines fonctionne comme génératrice, et l'énergie qu'elle développe est employée à actionner en partie l'autre qui fonctionne comme moteur. Une (ou plusieurs) source d'énergie étrangère fournit l'énergie nécessaire pour compenser les pertes dans les deux machines.

L'emploi des méthodes de l'estimation des pertes a en outre l'avantage d'exiger une puissance beaucoup moins grande que celle nécessaire au fonctionnement de la machine, car on n'a besoin que d'une puissance au plus égale à la somme des pertes.

Quand on ne dispose pas d'appareils permettant la mesure de la puissance mécanique, on peut employer les *méthodes de substitution.*

On peut par exemple actionner, à défaut d'un dynamomètre de transmission, une génératrice au moyen d'un moteur dont on connaît le rendement ou les pertes, et mesurer la puissance fournie à ce moteur.

Anciennement, quand les méthodes d'estimation des pertes

n'étaient pas connues, on employait beaucoup la méthode de substitution pour déterminer le rendement des génératrices. On actionnait par exemple une génératrice électrique au moyen d'un moteur à vapeur et l'on relevait les diagrammes de ce dernier; on remplaçait ensuite la machine électrique par un frein, que l'on chargeait jusqu'à ce que l'on ait reproduit les diagrammes dans les mêmes conditions de vitesse du moteur. Ces essais étaient longs et peu précis.

Aujourd'hui on n'applique guère la *méthode de substitution* qu'avec des machines électriques tarées, c'est-à-dire dont on a déterminé les pertes dans les conditions de fonctionnement données. Les génératrices électriques peuvent être employées avec avantage comme freins, c'est-à-dire pour mesurer le travail fourni par des moteurs thermiques à grande vitesse ou de grande puissance.

CHAPITRE III.

ESSAIS DES MACHINES A COURANT CONTINU.

§ 1. — Détermination de la chute de tension intérieure.

Dans la plupart des essais des machines à courant continu, soit pour déduire les résultats de ces essais, soit pour corriger ces résultats, on est obligé de connaître la valeur de la chute de tension à l'intérieur de la machine.

Le circuit intérieur de la dynamo se compose de 3 parties :

1° De celle comprise entre les bornes et les tiges porte-balais;
2° De celle comprise entre les tiges porte-balais et le collecteur;
3° De l'induit.

Nous examinerons successivement les procédés à employer pour déterminer la chute de tension dans ces diverses parties aux différentes charges.

CHUTE DE TENSION ENTRE LES BORNES ET LES TIGES PORTE-BALAIS.

La chute est due à la résistance de cette portion du circuit; cette dernière est négligeable quand la machine n'a pas d'enroulement inducteur série. Dans le cas contraire, on mesure la résistance soit au pont, soit par la méthode du v. m. et de l'a. m.

Pour calculer la chute de tension, dans le cas d'une dynamo compound, il ne faut pas oublier que, dans le cas d'une génératrice, il passe dans l'enroulement-série un courant d'intensité égale à celle du circuit extérieur, tandis que dans le cas d'un moteur l'enroulement-série est parcouru par un courant dont l'intensité est égale à celle du courant extérieur diminuée de l'intensité du courant d'excitation dérivé.

CHUTE DE TENSION ENTRE LES TIGES PORTE-BALAIS ET LE COLLECTEUR.

Dans le cas d'une génératrice munie d'un enroulement inducteur dérivé, l'intensité du courant dans cette partie du circuit de même que dans l'induit est égale à l'intensité du courant dans le circuit extérieur augmentée de l'intensité du courant dérivé; tandis que dans le cas d'un moteur, l'intensité est égale à celle du courant extérieur diminuée de celle du courant inducteur dérivé.

La chute de tension est due à la résistance de contact entre les balais et les tiges porte-balais, et entre les balais et le collecteur.

La résistance de contact entre les tiges porte-balais et les balais peut, dans le cas d'une disposition défectueuse des porte-balais, être assez considérable (nous avons constaté des chutes de tension atteignant 1 v.). On peut mesurer la chute de tension au moyen d'un v. m., en appuyant la pointe terminant l'une des extrémités du circuit sur le balai et l'autre contre la tige porte-balais. Du reste, en employant les méthodes indiquées plus loin, cette chute est mesurée en même temps que celle due à la résistance de contact des balais et du collecteur.

La résistance de contact des balais est essentiellement variable, elle dépend de l'état du collecteur, du t/m. de la machine, c'est-à-dire de la vitesse périphérique du collecteur, de la nature des balais, de leur pression sur le collecteur, de la densité du courant [1], du sens du courant, etc.

D'après les essais de M. M. Kahm, la résistance est plus grande quand le sens du courant est dirigé du collecteur au balai, que pour un courant de sens contraire, et la différence peut atteindre 15 pour 100.

Pour des *balais métalliques :*

La résistance de contact reste d'abord constante quand la densité du courant croît, puis, à partir d'une densité de 4 à 5 a. par centi-

---

[1] *Voir*, au sujet de la résistance de contact des balais, les articles de M. Arnold (*E. T. Z.*, 1889, p. 5), de M. Dettmar (*E. T. Z.*, 1890, p. 420) et l'ouvrage de M. Arnold, *Die Gleichstrom-maschine.*

mètre carré, la résistance décroît quand la densité du courant augmente; mais cependant la chute de potentiel augmente.

La chute de potentiel croît donc d'abord à peu près comme l'intensité du courant, puis croît ensuite moins rapidement.

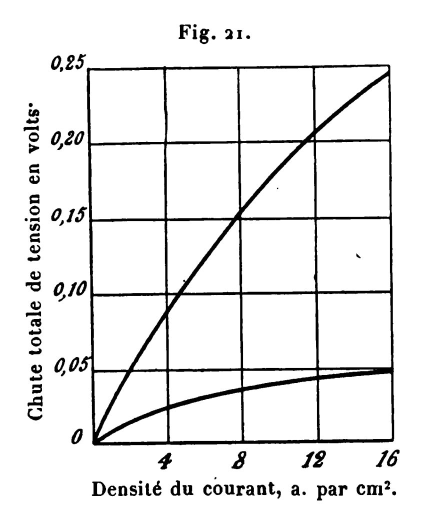
La résistance de contact est minimum au repos, elle croît d'abord très rapidement avec la vitesse jusqu'à une vitesse de 2^m par seconde, puis elle reste constante quand la vitesse croît encore.

L'augmentation de résistance avec la vitesse est d'autant plus considérable que la densité du courant est moindre.

La résistance de contact diminue quand la pression des balais sur le collecteur augmente.

Les deux courbes de la figure 21 donnent les limites entre

Fig. 21.



lesquelles varie la chute de tension due à la résistance des balais métalliques (pour les deux pôles, c'est-à-dire deux balais en série) en fonction de la densité du courant en a. par centimètre carré.

Pour les *balais en charbon:*

La résistance de contact décroît quand la densité du courant augmente. La chute de tension augmente donc moins rapidement que l'intensité du courant : ceci n'est vrai que quand on ne dépasse pas les densités admissibles dans la pratique (au maximum 9 à 10 a. par centimètre carré). Pour des intensités plus élevées la résistance augmente avec la densité et l'aiguille du v. m. ne reste plus stable.

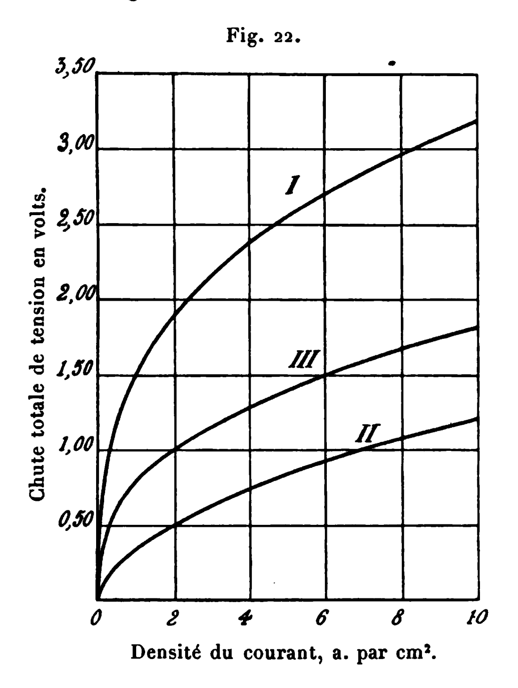
Avec des collecteurs en très bon état la résistance de contact croît avec la vitesse du collecteur ; avec un collecteur ne tournant pas tout à fait rond, la résistance de contact, après avoir crû avec la vitesse, décroît ensuite quand celle-ci augmente.

La résistance diminue quand la pression du charbon sur le collecteur augmente.

La résistance de contact est plus petite pour les charbons tendres que pour les charbons durs.

La courbe I de la figure 22 donne les valeurs maxima que peut

Fig. 22.



atteindre la chute de tension due à la résistance de contact des balais en charbon, en fonction de la densité du courant, et la courbe III a été relevée sur des charbons demi-durs, par la méthode de Arnold (toutes ces courbes se rapportent au double contact, c'est-à-dire donnent la chute totale).

M. Arnold [1] a indiqué une méthode permettant de mesurer la double résistance de contact.

---

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1889, p. 5.

On isole deux porte-balais de la tige (en prenant par exemple une tige d'un diamètre plus faible que l'on entoure de papier ou de toile isolante). On relie chacun des porte-balais à l'une des extrémités d'un circuit dans lequel on peut faire varier l'intensité du courant, au moyen d'un rhéostat par exemple. Le circuit étant fermé par les lames du collecteur dont la résistance est négligeable, on mesure la différence de potentiel entre les deux balais et entre les deux porte-balais (pour avoir au besoin la résistance de contact entre balai et porte-balai).

La surface de contact des balais étant connue, on en déduit la densité du courant et la résistance. On obtient ainsi la résistance du double contact : en faisant varier l'intensité du courant, la vitesse de la machine, la pression des balais (1) et l'on peut déterminer l'influence de ces diverses variables.

La chute de potentiel due au contact des balais peut également être déterminée, en installant sur chaque porte-balai un petit balai auxiliaire isolé, dans le prolongement des autres balais, et en mesurant à l'aide d'un v. m. la d. d. p. entre chacun des balais auxiliaires et le porte-balai correspondant. On fait la moyenne des valeurs obtenues pour chaque charge et l'on prend le double de cette moyenne comme résistance pour le double contact. On peut ainsi tracer la courbe donnant la chute de tension en fonction de l'intensité du courant. Dans ce mode d'essai on obtient souvent des valeurs très différentes pour les divers porte-balais, car la densité du courant n'est pas toujours la même partout. En outre, l'aiguille du v. m. ne reste pas fixe et il faut apporter une certaine attention pour bien relever les moyennes.

Avec une dynamo tournant très lentement, on peut même tenir le balai auxiliaire à la main.

Il n'est pas toujours commode d'installer un balai auxiliaire, aussi peut-on employer la méthode suivante quand il y a plusieurs balais par porte-balai. On isole, pour chaque tige, un des balais (par exemple en l'enveloppant de papier), on mesure alors la d. d. p.

---

(1) On peut déterminer la pression en employant un petit peson pour soulever le porte-balai qui tourne autour de la tige.

Le rapport des distances entre l'axe de la tige et le point d'application du peson et le milieu du balai permet de déterminer la pression.



entre chaque balai isolé et le porte-balai correspondant et on fait la moyenne.

Le rapport de la surface des balais non isolés à la surface des balais isolés permet de déterminer l'intensité qui correspond, tous les balais en place, à l'intensité mesurée pendant l'essai.

On est fondé à procéder ainsi, car la résistance de contact du balai isolé avec le collecteur est négligeable devant la résistance du v. m.

Naturellement on ne doit procéder à ces essais que lorsque les balais sont bien rodés et leur donner la pression normale, qui varie suivant le poids des porte-balais.

Les résultats de ces essais permettent de déterminer la chute de tension due au double contact des balais en fonction de l'intensité du courant dans l'induit. Le Tableau suivant donne les résultats d'essais d'après la méthode d'Arnold sur une dynamo de 360 kilowats 220 v. à 70 t/m. La surface de contact de chaque balai isolé était de 6^{cm}.

Intensité du courant I.	D. d. p. entre les porte-balais ou chute de tension *e*.	Résistance du double contact $r = \frac{e}{I}$.	Résistance par cm² pour le double contact $6r$.	Densité du courant par cm² $\frac{I}{6}$.
5	0,89	0,178	1,068	0,83
10	1,05	0,105	0,630	1,67
15	1,20	0,080	0,480	3,50
20	1,29	0,065	0,390	3,33
25	1,38	0,055	0,330	4,17
30	1,45	0,048	0,288	5,00
35	1,50	0,043	0,258	5,63
40	1,60	0,040	0,240	6,67
45	1,65	0,037	0,222	7,50
50	1,70	0,034	0,204	8,33

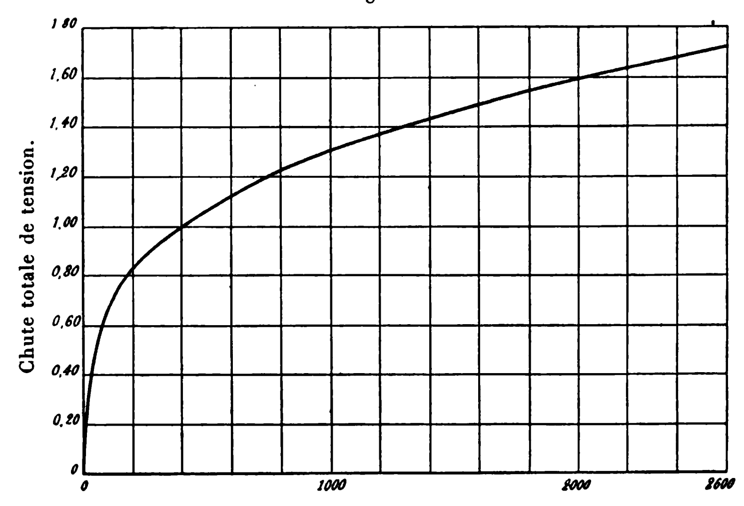
La courbe III de la figure 22 donne la valeur de la chute de tension en fonction de la densité du courant.

La surface totale des balais pour un pôle était de $295^{cm^2},2$ soit $\frac{295,2}{6} = 49,2$ fois plus forte que celle des balais d'essai. L'intensité du courant d'induit pour la même chute de tension était donc 49,2 fois plus forte que celle de l'essai.

Le Tableau suivant et la courbe de la figure 23 donnent la chute de tension totale due à la résistance de contact totale des balais, en fonction de l'intensité du courant d'induit.

Intensité du courant d'essai.	Intensité correspondante du courant d'induit.	Chute totale de tension.
5	246	0,89
10	492	1,05
15	733	1,20
20	984	1,29
25	1230	1,38
30	1476	1,45
35	1722	1,50
40	1960	1,60
45	2214	1,65
50	2460	1,70

Fig. 23.



Intensité du courant d'induit en ampères.

CHUTE DE TENSION DANS L'INDUIT.

Elle peut être définie théoriquement comme étant le quotient de la perte de puissance dans l'induit par l'intensité du courant.

La perte de puissance est due tant à la résistance ohmique qu'à la

mise en court-circuit des spires par les balais. Si i est l'intensité du courant dans une spire, l le coefficient de si dans cette dernière, la perte d'énergie est lors de la mise en court-circuit $\frac{li^2}{2}$.

Si s est le nombre de lames du collecteur, b le nombre de paires de balais, et N le t/m., la perte de puissance par seconde est $\frac{2bSli^2N}{60}$.

Il est impossible de déterminer à peu près exactement cette perte de puissance, et l'on admet que la chute de tension est due uniquement à la résistance ohmique de l'enroulement que l'on mesure.

Comme la résistance de contact des balais varie malgré toutes les précautions que l'on peut prendre d'un balai à l'autre, dans des limites assez considérables, et en outre que cette résistance de contact est variable avec l'intensité, la mesure de la résistance entre porte-balais peut dans certains cas entraîner à des erreurs considérables, le courant lors de la mesure pouvant ne pas se répartir dans l'enroulement de la même manière que le courant induit, lors du fonctionnement de machine.

Dans le cas d'une dynamo bipolaire, on peut mesurer la résistance intérieure au pont entre deux lames opposées du collecteur, ou bien en mesurant la chute de potentiel entre deux lames, l'une placée sous la rangée de balais positifs (on choisit pour cela la lame placée sous le milieu des balais), l'autre sous la rangée de balais négatifs. On recommence l'opération plusieurs fois en faisant tourner chaque fois l'induit d'un certain angle et l'on prend la moyenne des résultats.

Le dernier procédé peut s'employer pour des dynamos multipolaires enroulées en parallèle ou des dynamos enroulées en série parallèle ayant un nombre de balais égal au nombre de pôles, quand elles sont munies de balais métalliques. Pour de telles dynamos munies de balais en charbon, on peut remplacer pour l'essai ces derniers par des sortes de coins en cuivre, ayant l'épaisseur des balais et une certaine longueur, serrés à force entre le collecteur et les tiges porte-balais. Dans le cas de dynamos à enroulement en parallèle, munies de balais en charbon, si l'on peut maintenir l'intensité du courant d'essai constante pendant un certain temps, on peut procéder de la manière suivante. On mesure pour une intensité de courant donnée, la d. d. p. entre une lame placée au milieu d'une des rangées de balais positifs, et chacune des lames placées au milieu des rangées de balais négatifs ; on procède ainsi pour toutes les

rangées de balais positifs et la moyenne des résultats donne la chute de potentiel correspondant à l'intensité du courant d'essai.

Dans le cas d'une machine à enroulement série parallèle dans laquelle un certain nombre de paires de balais sont supprimées, on ne peut procéder ainsi, la résistance de contact, même avec l'emploi de coins en cuivre, est suffisante pour empêcher la bonne répartition du courant d'essai; on est alors obligé de déterminer la résistance intérieure de l'induit par le calcul.

Lors de l'essai de la dynamo de 360 kilowatts 220 v. 70 t/m. dont nous avons parlé plus haut, qui était à enroulement série parallèle avec 16 pôles et 10 rangées de balais, la détermination de la résistance intérieure, avec le procédé indiqué en employant des coins en cuivre, a donné 0,0039 Ω; par le calcul à la même température la résistance a été trouvée de 0,0031 Ω.

Pour pouvoir déterminer la résistance intérieure par le calcul, si l'on ne connaît pas la section des spires et la résistivité du cuivre, on peut procéder de la manière suivante : on mesure soit au pont, soit à l'aide d'un a. m. et d'un v. m. la résistance autant que possible à chaud entre deux lames du collecteur comprenant entre elles un angle aussi grand que possible; on répète la même opération pour d'autres lames et l'on prend la moyenne des résultats.

Sur le schéma de l'enroulement on étudie la répartition du courant et l'on peut, en négligeant la résistance des connexions avec le collecteur, déterminer la résistance d'une section de l'induit, et en déduire la valeur de la résistance intérieure. Si l'essai a été fait à froid, on note la température lors de l'essai, on tient compte de l'augmentation de résistance due à la température atteinte lors de l'essai en charge.

Pour un enroulement en parallèle avec $2p$ paires de pôles, on mesure la résistance r entre deux lames comprenant entre elles un angle de $\frac{360}{2p}$ degrés. Si r_1 est la résistance d'une section de l'induit et r_a la résistance intérieure on a :

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{(2p-1)r_1}, \qquad r_1 = r\frac{2p}{2p-1},$$

$$r_a = \frac{r_1}{2p} = \frac{r}{2p-1}.$$

Pour des machines munies de balais métalliques, fonctionnant à

une tension assez élevée, on peut ne pas tenir compte de l'augmentation de résistance des balais avec la vitesse et prendre comme résistance celle mesurée au repos, car la différence est relativement peu élevée. Pour des machines à faible tension, munies de balais métalliques (des dynamos pour électrolyse, par exemple) et pour celles munies de balais en charbon, on doit procéder aux essais de détermination de la chute de tension aux diverses charges.

Quand on a tracé, d'une part, la courbe donnant la chute de tension due à la résistance du double contact des balais, en fonction de l'intensité du courant dans l'induit et déterminé, d'autre part, la résistance r_a de l'induit et la résistance r_e de l'enroulement série, on peut, connaissant l'intensité du courant d'excitation aux diverses charges, déterminer la chute de potentiel due à la résistance intérieure et par conséquent la perte de puissance aux diverses charges.

Si I est l'intensité du courant dans le circuit extérieur, i_d l'intensité du courant dans la dérivation, l'intensité du courant dans l'induit est $I \pm i_d$, le signe $+$ s'appliquant aux génératrices et le signe $-$ aux moteurs.

Pour la dynamo compound de 360 kilowatts dont il est parlé plus haut, nous avons obtenu les valeurs suivantes :

Résistance à chaud de l'enroulement série......	0,00071 Ω
Résistance à chaud de l'induit..................	0,00344 Ω
Intensité du courant d'excitation pour 240 v....	21,6 a.

les essais de régularité de fonctionnement ayant montré que la d. d. p. étant pratiquement constante, le courant d'excitation est constant.

Le Tableau suivant donne la chute de potentiel à l'intérieur de la machine, la chute due à la résistance des balais ayant été déterminée au moyen de la courbe de la figure 23.

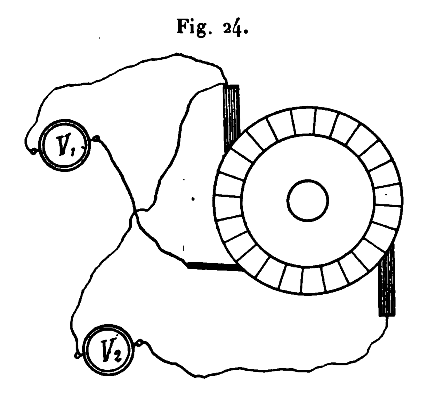
			Chute de tension			
Pleine charge.	Intensité du courant dans le circuit extérieur I.	Intensité du courant dans l'induit $I_a = I + 21,6$.	dans le circuit série $0,00071\ I$.	dans l'induit $0,00344\ I_a$.	aux balais.	Totale.
Pleine charge...	1500	1521,6	1,07	5,23	1,46	7,76
$\frac{3}{4}$ de charge....	1125	1146,6	0,80	3,94	1,33	6,07
$\frac{1}{2}$ de charge....	750	771,6	0,53	2,65	1,20	4,38
$\frac{1}{4}$ de charge....	375	396,6	0,27	1,36	1,00	2,63
A vide.........	0	21,6	0	0,07	0,30	0,37

§ 2. — Essais spéciaux permettant de se rendre compte de la qualité de la construction.

Outre les essais relatifs à l'isolement des enroulements et à l'augmentation de température, on doit parfois procéder à des essais, pour déterminer si l'enroulement de l'induit a été bien exécuté. Ces essais sont plutôt entrepris dans les ateliers de construction que lors des essais de réception, car, dans ce dernier cas, l'on n'a à se préoccuper que du bon fonctionnement, qui ne peut se produire que si l'enroulement est correctement fait. Les essais se font à vide, la machine fonctionnant comme génératrice et l'excitation restant bien constante.

Deux méthodes peuvent être employées pour vérifier si l'enroulement d'un induit est bien exécuté : l'une est due à M. Mordey, l'autre à M. Silvanus Thomson. Dans la *méthode de Mordey*, les balais étant calés dans leur position normale, c'est-à-dire suivant la ligne neutre, donnant le maximum de f. e. m., on emploie un petit balai auxiliaire. Ce petit balai, ayant un contact avec le collecteur d'une largeur très faible, est fixé à un petit porte-balai auxiliaire (*fig.* 24), portant un index qui se déplace devant un cercle gradué,

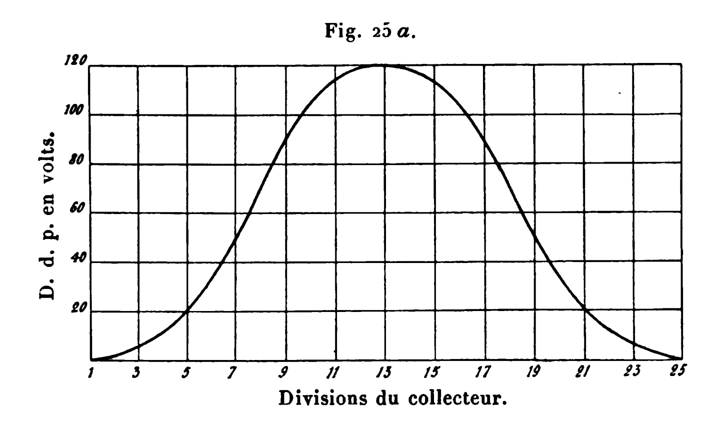
Fig. 24.



fixé à l'un des paliers de la machine et concentrique à l'arbre. Le cercle porte, à partir de la ligne de balais négatifs par exemple, des graduations correspondant à l'angle compris entre les axes de deux lames successives du collecteur.

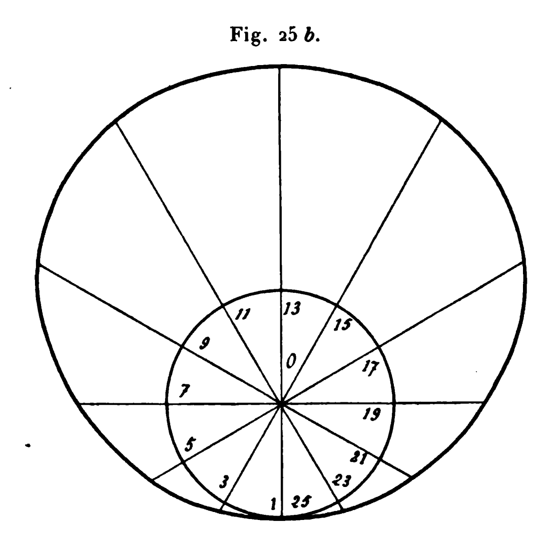
On intercale un v. m. V_1 entre le balai auxiliaire et le porte-balai négatif par exemple, et l'on déplace ce dernier de graduation en graduation, en relevant chaque fois la d. d. p. Si le t/m. et l'excitation

Fig. 25 *a*.



restent bien constants, les relevés suffisent. On peut vérifier la constance en intercalant entre les balais un v. m. V_2, dont les indications

Fig. 25 *b*.



doivent rester constantes; au besoin, si les indications de V_2 ne sont pas constantes, on relève chaque fois simultanément les indications de V_1 et V_2, on établit la proportionnalité, et l'on rapporte

à la tension normale. Le résultat de l'essai peut être représenté graphiquement de deux manières, soit en prenant comme abscisses la longueur proportionnelle aux angles, et comme ordonnées la d. d. p. déterminée (courbe de la *fig.* 25 *a*), soit en traçant un cercle et en portant des longueurs proportionnelles à la d. d. p. sur les rayons correspondants en dehors du cercle (courbe de la *fig.* 25 *b*). Si l'enroulement de l'induit est mal exécuté, on obtient une courbe discontinue, et si les flux ne sont pas bien symétriques, les deux parties de la courbe (relevée d'un balai négatif à un autre balai négatif) ne sont pas symétriques.

Dans l'essai exécuté comme il est indiqué, l'aiguille du v. m. V_1 vibre constamment, de sorte que les lectures sont malaisées. Pour remédier à cet inconvénient M. Swenburn a indiqué la méthode suivante : Les deux balais de la dynamo sont reliés par l'intermédiaire de deux boîtes de résistance B_1 et B_2 (*fig.* 26), dont la résistance

Fig. 26.

totale est suffisante pour que le courant qui les traverse (sous la d. d. p. normale de la machine) soit très faible. Le petit balai est relié par l'intermédiaire d'un galvanomètre sensible G et d'une résistance appropriée à un point du premier circuit situé entre les deux boîtes.

Chaque fois que l'on déplace le balai auxiliaire, on fait varier les

résistances des deux boîtes, de manière à ramener le galvanomètre au zéro. Si e est la d. d. p. entre le balai auxiliaire et le balai négatif et E la f. e. m. normale, r_1 la résistance de la boîte B_1 (placée du côté du balai négatif A) et r_2 la résistance de la boîte B_2, on a :

$$\frac{e}{E} = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \qquad e = \frac{E r_1}{r_1 + r_2}.$$

On peut également placer des v. m. V_1 et V_2 aux bornes des boîtes, et si V_1 et V_2 sont les indications de ces v. m., on a :

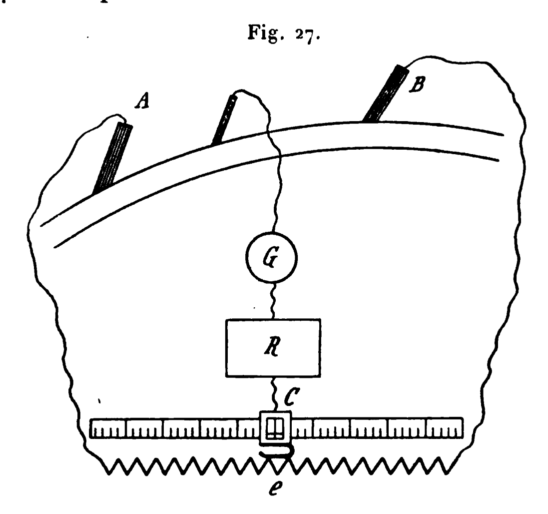
$$e = \frac{E V_1}{V_1 + V_2}.$$

Quand le t/m. est normal, on a

$$V_1 + V_2 = E \qquad e = V_1.$$

Cette méthode permet beaucoup de précision, les lectures sont indépendantes de la variation du t/m. Comme il est assez difficile de se procurer des boîtes de résistance pouvant supporter des d. d. p. très élevées, M. Chaumat a indiqué un procédé qui permet d'opérer beaucoup plus simplement.

Fig. 27.



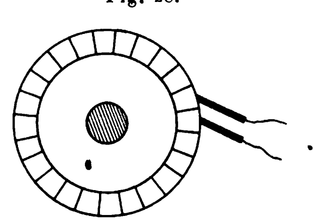
Un fil mince en maillechort ou en nickeline, etc., d'un diamètre bien régulier, est enroulé sur un cylindre de faible diamètre (*fig.* 27), d'une manière bien uniforme. La longueur du fil est

telle que sa résistance soit suffisante pour que l'intensité du courant ait une faible valeur quand on relie les deux extrémités aux balais A et B de la dynamo. Le fil est décapé suivant une génératrice du cylindre sur lequel il est enroulé et un contact glissant *e* peut se déplacer le long de cette génératrice. Ce contact est relié au balai auxiliaire par l'intermédiaire d'un galvanomètre sensible G et d'une résistance appropriée R, et porte un index se déplaçant devant une règle graduée.

On déplace le contact jusqu'à ce que le galvanomètre vienne au zéro; le rapport de la longueur lue sur la règle à partir de son extrémité correspondant à l'extrémité de la résistance de fil du côté du pôle négatif, à la longueur totale de cette dernière jusqu'à l'autre extrémité du fil, donne le rapport de *e* à E.

Méthode de Sylvanus Thomson. — On dispose un porte-balai portant un index se déplaçant devant un cercle gradué comme celui employé dans la méthode de Mordey. Ce porte-balai porte deux petits balais tenus l'un près de l'autre, à la distance correspondant à l'intervalle entre les axes de deux lames successives du collecteur. Les deux balais (*fig.* 28) sont reliés entre eux par un v. m. sensible, et on

Fig. 28.

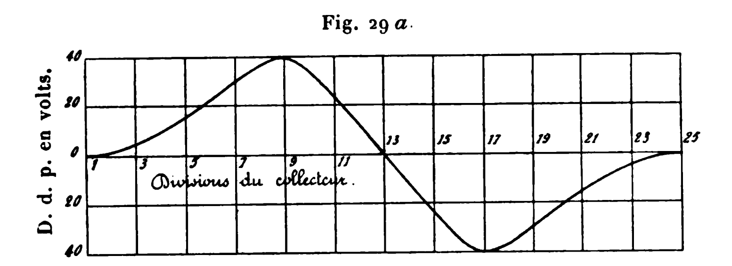


les déplace de manière à faire coïncider successivement l'index avec les divisions du cercle gradué. En construisant les courbes analogues à celles de Mordey et en tenant compte du signe de la d. d. p., les courbes ont l'allure représentée sur les figures 29 *a* et 29 *b*. En totalisant les ordonnées et en tenant compte des signes, on obtient les courbes de Mordey.

Si le t/m. ou l'excitation peuvent varier, on peut disposer un v. m. entre les balais et rapporter les d. d. p. lues, qui sont proportionnelles à la f. e. m. déterminée au même instant, à la f. e. m. normale.

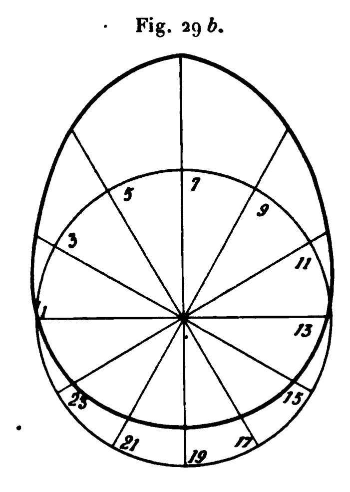
Quand on procède aux relevés des courbes de Mordey et de Sylvanus Thompson, sur tout le pourtour du collecteur d'une dynamo

Fig. 29 *a*.



multipolaire, on peut se rendre compte si les divers champs engendrent bien la même f. e. m. Les inégalités de champ peuvent provenir

Fig. 29 *b*.



soit d'une différence dans les ampères-tours ou les circuits magnétiques, soit d'un décentrage de l'induit.

§ 3. — Essais relatifs à la vérification du bon fonctionnement.

Relevé des caractéristiques. — Pendant tous les essais, on doit particulièrement porter son attention sur le fonctionnement des balais et examiner si, ceux-ci étant calés dans la position voulue, il ne s'y manifeste pas d'étincelles; on peut exiger d'une bonne dynamo

moderne qu'elle puisse fonctionner à toute charge sans étincelles nuisibles, le calage des balais restant fixe.

On procède à des essais de charge et de décharge brusques, en examinant le fonctionnement des balais.

On procède au besoin aux essais de surcharge comme cela est indiqué au cahier des charges (*voir* à ce sujet le règlement allemand à la fin du Volume).

Quand le circuit inducteur de la dynamo est muni d'un rhéostat de réglage, dont la résistance peut varier d'une façon continue, on a simplement à examiner si la dynamo peut donner la d. d. p. voulue aux limites extrêmes fixées. Quand, au contraire, le rhéostat est à touches, comme sa résistance varie brusquement quand on passe d'une touche à l'autre, il faut alors examiner si, aux charges intermédiaires, la tension obtenue ne s'écarte pas trop de celle fixée.

Ces essais doivent se faire, dans le cas d'une génératrice shunt, avec laquelle on doit pouvoir maintenir une tension pratiquement constante ou avec laquelle on doit pouvoir charger des accumulateurs.

Pour les moteurs, on doit examiner au besoin si, aux diverses charges, le t/m. reste bien dans les limites fixées.

Pour bien étudier une dynamo, on est souvent amené à tracer certaines *de ses caractéristiques*. Les caractéristiques sont des courbes donnant la relation entre deux des variables, les autres restant constantes.

Les diverses variables pour une machine sont : 1° la tension aux bornes; 2° l'intensité du courant dans le circuit extérieur; 3° l'intensité du courant d'excitation (proportionnelle aux ampères-tours); 4° la vitesse ou t/m.

TRACÉ DES CARACTÉRISTIQUES DES GÉNÉRATRICES.

Les caractéristiques sont tracées la dynamo ayant un t/m. constant; on a donc au maximum trois variables, ce qui donne au plus trois sortes de caractéristiques par genre de dynamo.

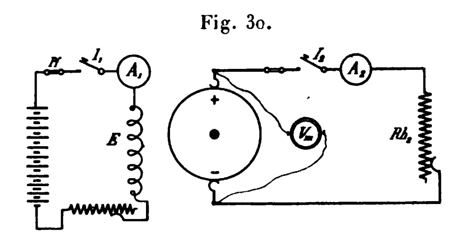
Génératrices à excitation indépendante. — Les trois variables sont I, intensité du courant dans le circuit extérieur, qui est égale à l'intensité du courant d'induit, $\mathcal{E}$ la d. d. p. aux bornes et i l'inten-

sité du courant d'excitation. Le Tableau suivant indique les trois caractéristiques.

Numéros.	I.	$\mathcal{E}$.	i.
1...........	c	y	x
2...........	x	c	y
3...........	x	y	c

Le premier genre de caractéristiques est le plus important; en prenant $I = o$, on a *la caractéristique à vide* de la machine, ou caractéristique proprement dite. Cette caractéristique se trace pour tous les genres de génératrices, elle donne la relation entre l'intensité ou les ampères-tours d'excitation et la f. e. m. de la machine (nous désignons toujours par $\mathcal{E}$ la tension aux bornes et par E la f. e. m. dans l'induit). On a alors $\mathcal{E} = E$. Le schéma de montage est indiqué figure 3o, en y supposant l'interrupteur I_2 du circuit d'utilisation

Fig. 3o.



ouvert; on dispose un rhéostat dans le circuit d'excitation de manière à pouvoir y faire varier l'intensité du courant, et l'on branche un v. m. V_m aux bornes de la génératrice. Le mieux est d'employer pour vérifier le t/m., que l'on doit maintenir autant que possible constant, un tachymètre bien étalonné. Si l'on doit mesurer le t/m. au moyen d'un compte-tours; il faut, pour qu'une opération soit valable, que $\mathcal{E}$ varie très peu pendant la durée d'application de ce dernier, et prendre la valeur moyenne. Si le t/m. a varié, on ramène la valeur de $\mathcal{E}$ au t/m. normal. Si l'on a $\mathcal{E}_1$ à N_1 t/m., on aura

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 \frac{N}{N_1}.$$

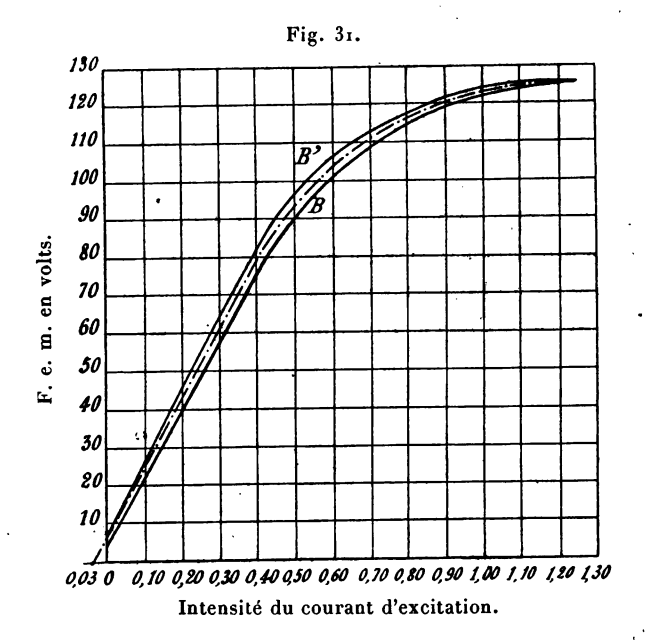
On relève d'abord la f. e. m. la dynamo non excitée, c'est-à-dire la f. e. m. due au magnétisme rémanent, puis on excite ensuite avec un courant très faible de manière que son action s'ajoute à celle du

magnétisme rémanent. Le v. m., s'il est à aimant permanent, doit donc marquer dans le même sens; si l'on a un v. m. à fil chaud, il faudra pour un courant excessivement faible que la f. e. m. augmente.

On procède ensuite aux relevés en faisant croître peu à peu le courant d'excitation, sans jamais le faire décroître; si l'on a dépassé la valeur voulue, on devra couper le circuit d'excitation, puis faire croître ensuite l'intensité; on procède ainsi jusqu'à ce que l'on ait atteint l'intensité maximum admissible. On continue alors à procéder aux relevés, en faisant décroître peu à peu l'intensité du courant d'excitation, sans jamais revenir en arrière; si l'on a une intensité trop faible, on devra revenir au courant maximum pour le faire décroître ensuite.

On obtient ainsi deux courbes, l'une inférieure ABC (*fig.* 31),

Fig. 31.



Intensité du courant d'excitation.

représentant la f. e. m. pour le courant allant en croissant, l'autre au-dessus C′B′A′, pour le courant allant en décroissant; la différence entre les ordonnées des deux courbes, qui peut dépasser 5 pour 100, est due à l'hystérésis. On prend comme courbe définitive la moyenne entre les deux courbes.

Si l'on a atteint une intensité très élevée pour l'excitation, le point A' de la courbe correspondant à l'excitation nulle peut être au-dessus du point A, c'est-à-dire que le magnétisme rémanent peut avoir été renforcé. Le modèle de la feuille à tenir pour cet essai est donné à la fin du Volume, sous le n° 1.

La caractéristique n° 2 donne l'intensité du courant d'excitation nécessaire pour maintenir une d. d. p. constante aux bornes, en fonction de l'intensité du courant dans le circuit extérieur.

La caractéristique n° 3 donnant la tension aux bornes en fonction de l'intensité du courant dans le circuit extérieur, c'est-à-dire de la charge de la machine à excitation constante, est très employée, car elle permet de se rendre compte de l'influence de la réaction d'induit.

Le schéma de montage est indiqué figure 30. Le rhéostat Rh_1 permet de maintenir constante l'intensité du courant d'excitation. Le rhéostat Rh_2 permet de faire varier la charge, c'est-à-dire le débit de la dynamo.

Quand le t/m. de la dynamo ne peut être maintenu constant, il y a une correction à faire dans les résultats; mais ici la tension n'est pas proportionnelle aux t/m., c'est seulement la f. e. m. qui y est proportionnelle.

Si $\mathcal{E}_1$ est la d. d. p. à N_1 t/m., l'intensité du courant étant I, la chute de tension e due à la résistance de contact des balais et à la résistance intérieure de l'induit, étant déterminée comme il a été indiqué, la f. e. m. est $E_1 = \mathcal{E}_1 + e$ à N_1 t/m.; à N t/m. elle sera :

$$E = E_1 \frac{N}{N^1}$$

et la d. d. p. sera $E - e$. La différence du t/m. ne doit pas être trop grande, afin que l'on puisse négliger l'influence de la variation de vitesse du collecteur sur la résistance de contact des balais. Le modèle de la feuille à tenir pour cet essai est donné sous le n° 2 à la fin du Volume.

Ainsi, dans cet essai, au quatrième relevé, la vitesse a varié, elle n'est que de 1 100 t/m. au lieu de 1 150 t/m., l'intensité du courant est de 15,5 a. et la tension $\mathcal{E} = 105,0$ v. Sur la figure 32 sont rapportées les courbes donnant la chute de tension en fonction de l'intensité du courant. La courbe I (une droite) donne la chute due à la résistance de l'induit, la courbe II, la chute aux balais et la courbe III,

dont les ordonnées sont égales à la somme des ordonnées des courbes I et II, donne la chute totale; pour 15,5 a. on a comme chute 3,2 v.; d'où :

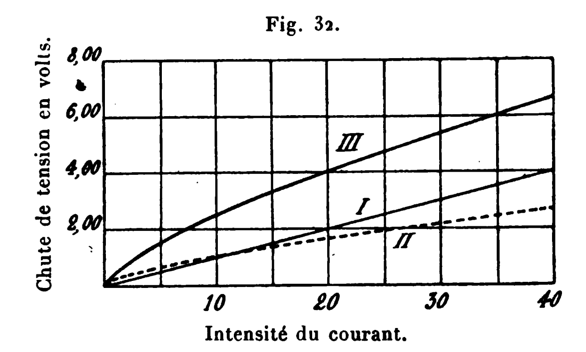
$$E_1 = \mathcal{E}_1 + e = 101{,}0 + 3{,}1 = 104{,}2 \text{ v.},$$

$$E = E_1 \frac{N}{N_1} = 104{,}2 \times \frac{1150}{1100} = 109{,}0 \text{ v.}$$

On aura donc :

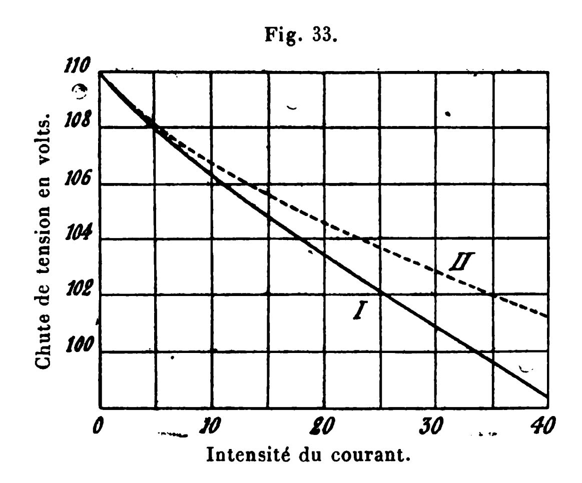
$$\mathcal{E} = E - e = 109{,}0 - 3{,}2 = 105{,}8 \text{ v.}$$

Fig. 32.



La caractéristique (*fig.* 33, courbe I) est obtenue en portant en abscisses les intensités du courant dans le circuit extérieur et en

Fig. 33.



ordonnées les tensions correspondant aux bornes. En augmentant les ordonnées de cette courbe de la valeur de la chute de tension

correspondante (donnée par la courbe III, *fig.* 32), on a la courbe II de la f. e. m., et la différence entre la f. e. m. à vide et les ordonnées de II donne pour chaque valeur de l'intensité la chute de potentiel due à la réaction d'induit. La courbe de la figure 34, dont les ordonnées sont égales à ces différences (*fig.* 32), donne la chute de tension due à la réaction d'induit, en fonction de l'intensité du courant.

La courbe II de la figure 33 donne, pour chaque valeur de l'intensité, la valeur de la f. e. m. induite : c'est *la caractéristique interne* de la dynamo.

Génératrices excitées en dérivation. — Les variables sont l'intensité I du courant dans le circuit extérieur, la tension $\mathcal{E}$ aux bornes et la résistance r du circuit inducteur (variable au moyen du rhéostat d'excitation); on a, si i représente l'intensité du courant d'excitation,

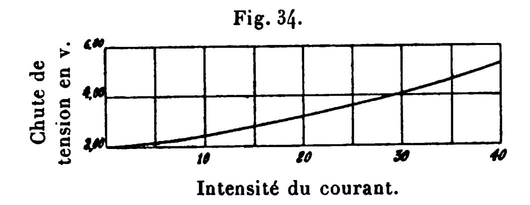
$$i = \frac{\mathcal{E}}{r};$$

l'intensité du courant I_a dans l'induit est $I + i$. Le Tableau suivant indique les caractéristiques que l'on peut tracer.

Numéros.	I.	$\mathcal{E}$.	r.
1..........	c	y	x
2..........	x	c	y
3..........	x	y	c

Les caractéristiques portant le n° 1 sont rarement tracées, on peut

Fig. 34.

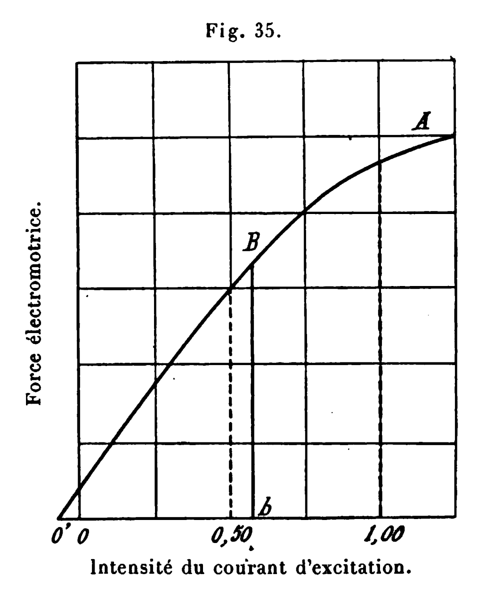


cependant tracer celle correspondant à $I = 0$, c'est-à-dire la caractéristique à vide.

En somme on a dans ce cas affaire à une dynamo excitée en série, le circuit d'excitation correspondant alors au circuit extérieur. On sait qu'alors la dynamo ne s'amorce pour un t/m. donné que lorsque la résistance est inférieure à une certaine valeur. Cette valeur limite peut être soit déterminée par un essai direct, soit au moyen de la

caractéristique à vide; dans ce cas, on procède de la manière suivante : O'BA est la caractéristique à vide (*fig.* 35), *b*B la f. e. m. correspondant au commencement du coude de cette dernière, O'*b* représente le courant d'excitation correspondant (courant d'excitation réel, augmenté de celui représentant le magnétisme rémanent); la résistance maximum que peut avoir le circuit d'excitation est représentée par $\frac{bB}{O'b}$. On voit que la dynamo ne peut donner une f.e.m. inférieure à celle correspondant au coude de la caractéristique à vide (1).

Fig. 35.



(1) Ce fait peut, du reste, être démontré directement. Pour un t/m. donné, tant que l'on est dans la partie en ligne droite de la caractéristique, le flux est proportionnel à l'intensité du courant d'excitation, on a :

$$\Phi = ki,$$

k étant une constante; on a en outre k_1 étant une autre constante :

$$E = k_1 \Phi$$

et

$$i = \frac{E}{r},$$

d'où

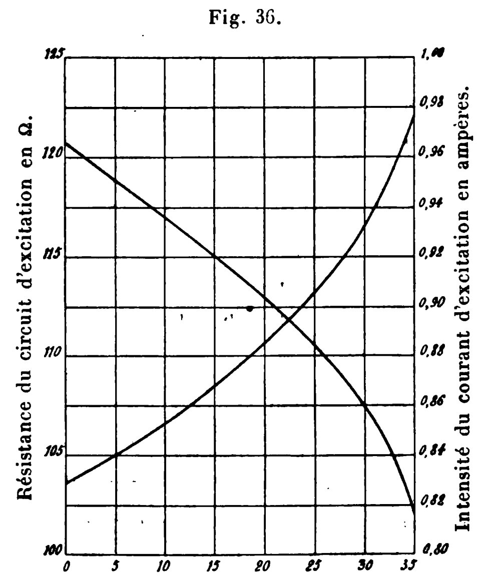
$$E = kk_1 \cdot$$

Équation qui n'est réalisée que pour $E = 0$ ou $E = \infty$.

Les caractéristiques du genre n° 2, donnant la résistance du circuit inducteur, pour maintenir une tension donnée aux bornes quelle que soit la charge (ou l'intensité du courant extérieur), peuvent servir lors de l'étude du rendement de la machine. Comme l'intensité du courant d'excitation est très faible, cette courbe, en prenant pour ordonnée l'intensité du courant d'excitation $\left(\frac{\mathcal{E}}{r}\right)$ au lieu de r, est pratiquement identique à la caractéristique n° 2 de la dynamo, excitée par une source extérieure.

Ces courbes (*fig.* 36) ne peuvent être tracées que si la vitesse est

Fig. 36.



Intensité du courant dans le circuit extérieur.

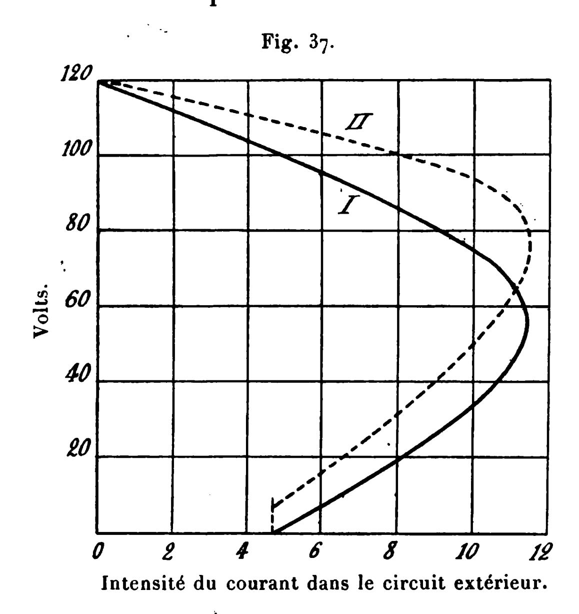
bien régulière, les corrections de vitesse étant impossibles à effectuer d'une façon un peu précise.

Les caractéristiques du genre n° 3, donnant la d. d. p. aux bornes en fonction de l'intensité du courant dans le circuit extérieur, permettent en traçant ensuite la caractéristique de la f. e. m. ou *caractéristique interne*, de bien se rendre compte de l'influence de la réaction d'armature.

La caractéristique a la forme indiquée en traits pleins, courbe I de la figure 37; elle présente un coude, c'est-à-dire que l'intensité

du courant extérieur présente un maximum. La courbe ne revient pas passer par l'origine (comme il est cependant indiqué dans la plupart des traités théoriques); elle coupe, par suite de l'influence du magnétisme rémanent, l'axe des x, en un point plus ou moins éloigné de l'axe. Ce point, du reste, n'a rien de fixe, il dépend de l'intensité du magnétisme rémanent qui est variable.

Fig. 37.



Intensité du courant dans le circuit extérieur.

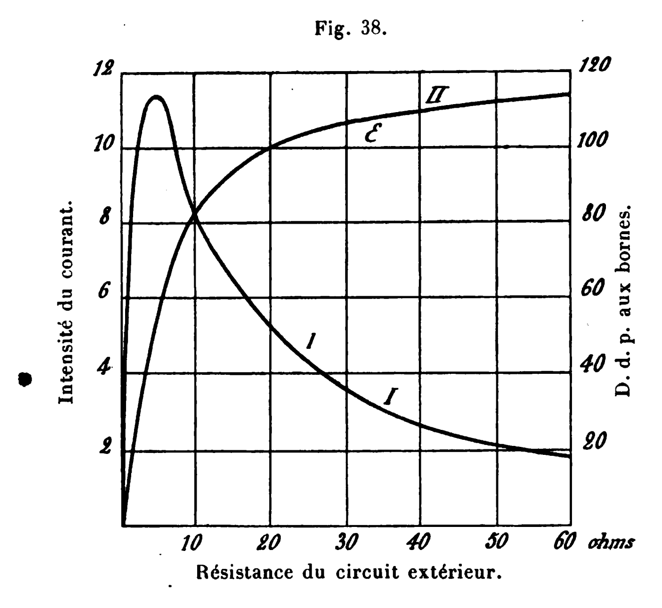
Avec une bonne machine moderne, on ne peut guère arriver à tracer la caractéristique jusqu'au coude, l'intensité du courant devenant trop forte et pouvant arriver à détériorer la machine. On n'y arrive qu'avec des machines présentant une grande résistance intérieure et une grande réaction d'induit.

Si l'on trace la courbe représentant la valeur de la tension aux bornes, en fonction de la résistance du circuit extérieur $\left(\text{c'est-à-dire } \frac{\text{I}}{\mathcal{E}}\right)$, on obtient une courbe ayant l'allure de la courbe II (*fig.* 38). La courbe I représente l'intensité du courant dans le circuit extérieur en fonction de la résistance de ce circuit.

On peut arriver à tracer la partie inférieure de la courbe I (*fig.* 37). Il faut pour cela que le circuit extérieur ait une résistance très faible. Il ne faut pas diminuer brusquement la résistance, car on pourrait

s'exposer à brûler l'a. m.; en effet, si l'on diminue brusquement la résistance, le courant peut avoir pendant un instant une intensité énorme, car, vu l'impédance considérable du circuit d'excitation, l'intensité du courant dans ce circuit ne diminue pas brusquement. Il faut donc placer l'a. m. (ainsi qu'une résistance très faible shuntée au besoin), la dynamo étant au repos, puis la mettre en marche, ou bien couper le circuit d'excitation avant de placer l'a. m.

Fig. 38.



On intercale entre les bornes l'a. m. et un rhéostat que l'on amène au zéro et l'on note l'intensité du courant, le v. m. est alors au zéro, la résistance de l'a. m. étant négligeable; on intercale ensuite une résistance très faible, l'intensité du courant augmente, ainsi que l'indication du v. m. On peut ainsi tracer la partie inférieure de la courbe, jusqu'à ce que l'intensité atteigne la valeur dangereuse.

Il faut que le t/m. reste aussi constant que possible pendant la durée des relevés. Pour de faibles différences, on peut corriger de la manière suivante :

On a $\mathcal{E}_1$ à N_1 t/m. et l'on veut avoir $\mathcal{E}$ à N t/m.

Si e est la chute de potentiel correspondant à l'intensité du courant, la f. e. m. E_1 à N_1 t/m. est :

$$E_1 = \mathcal{E}_1 + e.$$

Toutes choses égales d'ailleurs, la f. e. m. E' à N t/m. serait :

$$E' = E_1 \frac{N}{N_1},$$

et la tension

$$\mathcal{E}' = E' - e.$$

Mais l'augmentation de la d. d. p. entraîne une augmentation de l'intensité du courant d'excitation, qui passe de la valeur i_1 déterminée à la valeur i', et l'on a :

$$i' = i_1 \frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}_1}.$$

Cette augmentation de l'intensité du courant d'excitation entraîne une augmentation de f. e. m., et ainsi de suite. On peut se contenter d'une première approximation et admettre que la tension augmente de la même quantité que la f. e. m. à vide, pour la même augmentation du courant d'excitation. On cherche sur la caractéristique à vide, la f. e. m. E_2 correspondant à l'excitation i_1, et la f. e. m. E_3 correspondant à l'excitation i', et l'on prend :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}' + E_3 - E_2.$$

Naturellement cette méthode ne donne qu'une approximation et ne pourrait être employée dans le cas de variations considérables du t/m., il faut que celles-ci ne dépassent pas 5 pour 100 pour que l'on puisse admettre que les résultats des calculs sont pratiquement exacts.

Le modèle de la feuille à employer dans les essais est donné sous le n° 3 à la fin du Volume.

Le t/m. normal étant 1600, on a trouvé pour 1550 t/m.

$$i_i = 0{,}8 \text{ a.}, \qquad \mathcal{E}_1 = 101 \text{ v.}$$

L'intensité dans le circuit extérieur étant de 3,56 a., on trouve pour une intensité de $3{,}56 + 0{,}80 = 4{,}36$ a. sur la courbe donnant la chute de tension entre porte-balais en fonction de l'intensité, une chute 3,1 v. La f. e. m. est donc :

$$E_1 = \mathcal{E}_1 + e = 101 + 3{,}1 = 104{,}10 \text{ v.}$$

On aura :

$$E' = E_1 \frac{N}{N_1} = 104{,}10 \times \frac{1600}{1550} = 107{,}5 \text{ v.},$$

$$\mathcal{E}' = 107{,}5 - 3{,}10 = 104{,}4,$$

$$i'_1 = i_1 \frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}_1} = 0{,}80 \times \frac{104{,}4}{101} = 0{,}83 \text{ a.}$$

Sur la courbe à vide, on a :

pour une excitation de 0,80 a. $E_2 = 110$ v.
» » 0,83 a. $E_3 = 112,1$ v.

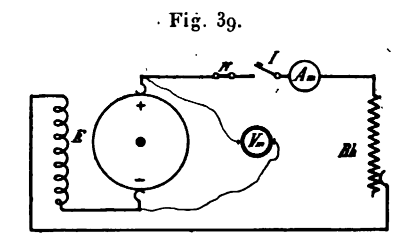
On aura donc :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}' + E_3 - E_2 = 104,4 + 112,1 - 110 = 106,5 \text{ v.}$$

En ajoutant aux ordonnées de la courbe donnant la tension aux bornes en fonction de l'intensité du courant dans le circuit extérieur, la chute correspondante de tension à l'intérieur de la machine (d'après la courbe donnant cette chute en fonction de l'intensité du courant dans l'induit, qui est égale à l'intensité du courant dans le circuit extérieur augmentée de l'intensité d'excitation), on obtient la *caractéristique interne de la machine* qui a l'allure de la courbe II (*fig.* 37).

Génératrices excitées en série. — Comme dans ce cas l'intensité du courant d'excitation est égale à l'intensité du courant dans le circuit extérieur, on n'a que deux variables, et par conséquent une seule caractéristique, celle de la variation de tension aux bornes en fonction de la charge ou de l'intensité du courant.

Fig. 39.

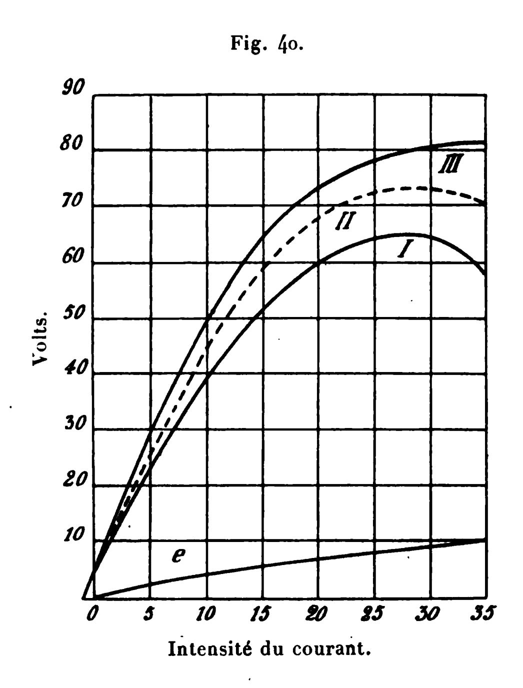


La figure 39 indique le schéma de montage pour l'essai; le modèle de la feuille à tenir est donné sous le n° 4 à la fin du Volume.

La courbe est représentée sous le n° 1 (*fig.* 40). Si l'on trace la courbe donnant la chute de tension e à l'intérieur de la dynamo en fonction de l'intensité du courant et que l'on augmente les ordonnées de la courbe I de celles de la courbe e, on obtient la courbe II, qui est la *caractéristique intérieure* de la dynamo. Si l'on rapporte sur le même dessin la caractéristique à vide, courbe III, la différence des ordonnées entre les courbes III et II donne la chute de tension due à

la réaction d'induit. Les trois courbes coupent l'axe des x au même point correspondant au magnétisme rémanent. On sait que la dynamo ne s'amorce que quand la résistance extérieure est inférieure à une certaine limite (*voir* p. 71).

Fig. 40.



Les corrections relatives aux variations de vitesse sont faciles à faire, si à N_1 t/m. on a $\mathcal{E}_1$, la f. e. m. sera $E_1 = \mathcal{E}_1 + e$, e étant la chute de tension intérieure pour l'intensité I; on aura à N t/m.

$$E = E_1 \frac{N}{N_1},$$

d'où l'on déduira :

$$\mathcal{E} = E - e.$$

Soit par exemple le relevé n° 2 sur la feuille modèle n° 4. On a $N = 1500$ et $N_1 = 1400$; pour $I = 10$, on a eu $\mathcal{E}_1 = 22,1$ v.

La chute de tension intérieure pour 10 a. est de 3,9 v.

La f. e. m. à 460 t/m. est donc

$$E_1 = 22,1 + 3,9 = 26,0 \text{ v}.$$

A 1500 t/m. elle sera :

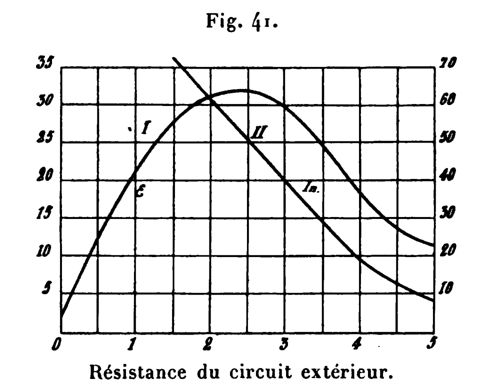
$$E = 26,0 \times \frac{1500}{1400} = 27,90,$$

on aura :

$$\mathcal{E} = 27,90 - 3,9 = 24,0 \text{ v.}$$

On peut également tracer la courbe de la tension aux bornes

Fig. 41.



Résistance du circuit extérieur.

(courbe I, *fig.* 41) et celle de l'intensité du courant (courbe II, *fig.* 41) en fonction de la résistance du circuit extérieur.

CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS.

Les moteurs à courant continu fonctionnent le plus ordinairement sous une différence de potentiel constante (cette d. d. p. varie du simple au double par exemple pour des moteurs de tramways) et les variables sont l'intensité du courant, la vitesse, la résistance du circuit d'excitation, le nombre de tours, le couple résistant et la charge (produit du couple par la vitesse angulaire). Les essais se font donc en chargeant le moteur soit directement au moyen d'un frein, soit en lui faisant commander une génératrice; celle-ci peut être tarée à l'avance de manière à ce que l'on puisse déterminer immédiatement la charge, ou bien, on peut déterminer la charge, en déduisant de la puissance fournie au moteur (mesurée au moyen d'un a. m. et d'un v. m. ou au moyen d'un w. m.) la puissance perdue dans le moteur qui peut être calculée comme nous le verrons.

Dans le cas où la tension aux bornes est constante, un moteur

excité en dérivation fonctionne absolument comme un moteur à excitation indépendante, si ce n'est que l'intensité dans l'induit, dans le cas du moteur à excitation indépendante, est égale à l'intensité dans le circuit extérieur, tandis que dans le cas d'un moteur excité en dérivation, l'intensité dans l'induit est égale à l'intensité dans le circuit extérieur, diminuée de l'intensité du courant d'excitation.

Les caractéristiques en charge d'un moteur en dérivation ne sont pas très intéressantes au point de vue du fonctionnement. On se contente de vérifier si, la résistance du circuit d'excitation restant constante, le t/m. ne varie pas trop, pour une tension constante. On sait que le t/m. peut, suivant les circonstances, augmenter ou diminuer avec la charge, ceci dépendant de la résistance de l'induit et de la réaction d'armature (¹).

Lors des essais d'un moteur à excitation indépendante ou à excitation en dérivation il faut apporter une grande attention au montage du circuit d'excitation, et veiller à ce que celui-ci ne puisse pas être coupé accidentellement. Si la machine est chargée au moment où le circuit est coupé, elle peut s'arrêter brusquement et, comme elle ne développe plus de force contre-électromotrice, l'intensité du courant prend immédiatement une intensité énorme, de sorte qu'il peut se produire des détériorations si les fusibles employés sont un peu forts. Si la machine n'est pas en charge, elle peut, au moment de la rupture du courant d'excitation, continuer à tourner sous l'influence du magnétisme rémanent, la vitesse alors ainsi que l'intensité du courant augmentent dans des proportions considérables et il peut en résulter des accidents.

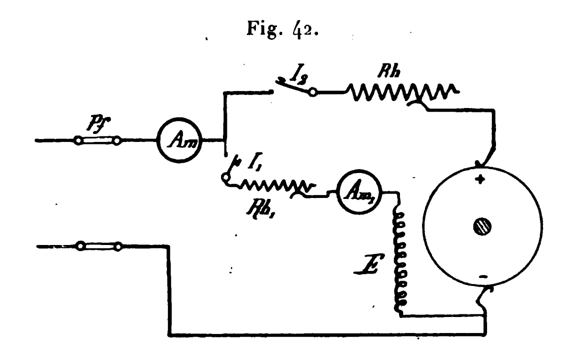
Lors du démarrage, même à vide, d'un moteur à excitation en dérivation, il faut prendre des précautions. Si l'on a un interrupteur et un rhéostat dans le circuit d'excitation, avant la mise en marche il faut fermer l'interrupteur I_1 (*fig.* 42), amener le rhéostat Rh_1 au minimum de résistance, et s'assurer au moyen de l'a. m. A_{m_1}, si le courant normal circule bien dans le circuit. On amène ensuite le rhéostat de démarrage Rh_2 dans la position de maximum de résistance, on ferme l'interrupteur I_2 et l'on manœuvre lentement le rhéostat Rh

(¹) La résistance d'induit a pour effet de diminuer la f. é. m., ce qui, toutes choses égales d'ailleurs, tend à diminuer le t/m. La réaction d'induit, au contraire, affaiblit le champ, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse si la f. e. m. reste constante.

en diminuant sa résistance jusqu'à ce que le t/m. normal soit atteint.

Pour les dynamos en série, il y a naturellement moins de précautions

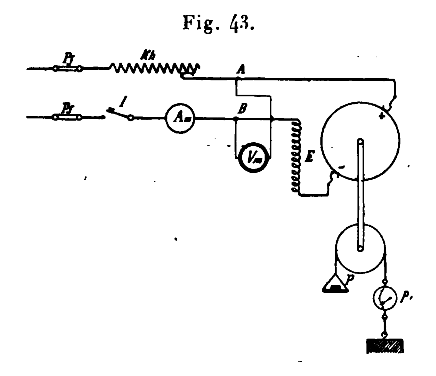
Fig. 42.



à prendre, il suffit d'intercaler pour le démarrage, un rhéostat Rh (*fig*. 43) dans le circuit.

Le schéma de la figure 43 donne le montage, pour le tracé de la

Fig. 43.

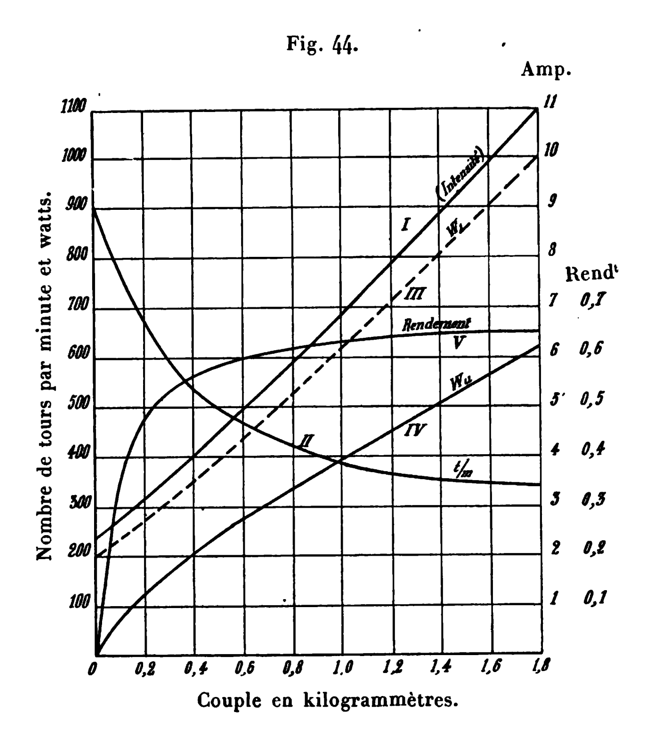


caractéristique en charge d'un moteur série, la charge étant obtenue au moyen d'un frein à corde avec peson. On lance d'abord le moteur à vide, en se servant du rhéostat de démarrage, puis on retire celui-ci du circuit, ou du moins on ne s'en sert plus que pour maintenir la tension constante aux bornes du moteur, d'après les indications du v. m. On note le t/m. et l'intensité du courant à vide, puis ensuite on met en place le frein, on dispose un petit poids dans le plateau de la balance, et l'on note le poids placé, l'indication du

eson, l'intensité du courant et le t/m. Le modèle de la feuille à tenir est donné sous le numéro 5, à la fin du Volume.

Les courbes de la figure 44 donnent les caractéristiques d'un moteur

Fig. 44.



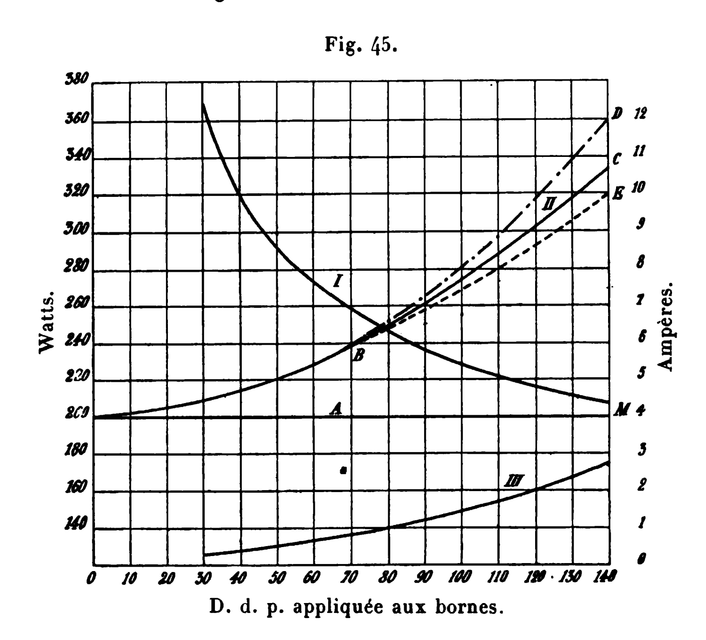
série, en fonction du couple ; la courbe I donne la variation de l'intensité du courant et la courbe II la variation du t/m. L'essai permet de déterminer en même temps le rendement, etc. ; nous en reparlerons plus loin.

Caractéristiques comme moteur à vide. — En excitant une dynamo par une source indépendante et en la faisant tourner comme moteur, on peut tracer deux sortes de caractéristiques, qui ont une grande importance dans l'étude du rendement de la machine. La première est la *caractéristique à vitesse constante*. On applique aux bornes de la machine une tension variable et l'on règle chaque fois l'intensité du courant d'excitation de manière à ce que le t/m. reste constant. On relève, pour chaque valeur de la tension, l'intensité du

courant dans l'induit, et au besoin l'intensité du courant d'excitation.

La courbe I de la figure 45 donne la variation de l'intensité du

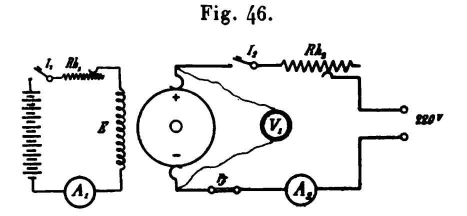
Fig. 45.



courant en fonction de la d. d. p. aux bornes et la courbe II, la variation de la puissance absorbée, c'est-à-dire le produit de l'intensité par la tension. La courbe III donne la variation de l'intensité du courant d'excitation pour maintenir la vitesse normale.

Le schéma du montage à employer pour cet essai est donné figure 46; dans le circuit inducteur est monté un rhéostat permettant

Fig. 46.



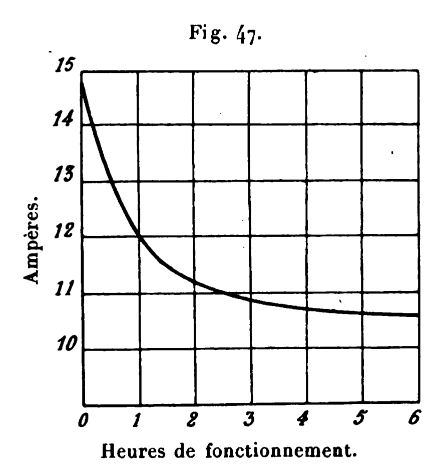
de faire varier l'intensité du courant d'une manière continue. Dans le circuit induit, si l'on a une source d'énergie à potentiel constant,

on monte un rhéostat avec lequel on peut obtenir une résistance très grande, un rhéostat de lampes par exemple; on peut également avoir comme source d'énergie une batterie d'accumulateurs dont on fait varier le nombre d'éléments en service, ou une dynamo génératrice à excitation indépendante, dont on peut faire varier la tension en agissant sur l'excitation (une dynamo excitée en dérivation ne permet pas d'obtenir une tension suffisamment faible, à moins que l'on puisse faire varier sa vitesse). On diminue la tension jusqu'à ce que l'intensité du courant arrive à prendre une valeur dangereuse.

Comme dans tous les essais où il s'agit de maintenir une vitesse fixe, on peut se servir d'un tachymètre rudimentaire, tel qu'un entraîneur pour bicyclette; il s'agit seulement de conserver l'index fixe.

Ainsi que dans tous les essais de moteurs, on doit, avant l'essai, faire fonctionner la machine pendant un certain temps, afin que les paliers soient bien échauffés et que la résistance de frottement soit minimum. Pour cela, on fait tourner la dynamo comme moteur, la tension étant maintenue constante, et on note à intervalles réguliers, tous les quarts d'heure par exemple, l'intensité du courant; cette intensité diminue peu à peu, et on peut commencer l'essai lorsque dans deux relevés consécutifs on a obtenu la même intensité.

Fig. 47.



Il faut parfois faire fonctionner la machine pendant un temps assez long, avant que le travail de frottement ait atteint son minimum; la courbe de la figure 47, tracée d'après un essai de M. Dettmar,

donne la variation de l'intensité en fonction de la durée du fonctionnement; on voit que le régime permanent n'a été établi qu'au bout de 4 heures et demie de fonctionnement.

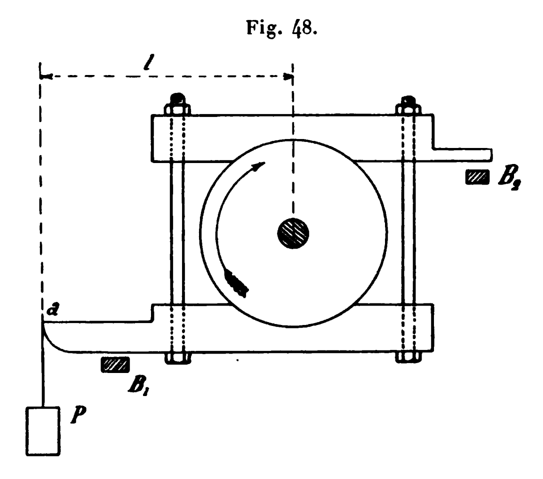
Le modèle de la feuille à tenir pour cet essai est donné sous le n° 6, à la fin du volume.

La caractéristique à excitation constante, qui donne, en fonction de la tension aux bornes $\mathcal{E}$, 1° la vitesse, ou t/m., 2° l'intensité du courant I, ainsi naturellement que $\mathcal{E}I$, se trace d'une manière analogue à la première, le schéma de montage est le même.

Essais de démarrage. — Il y a un grand intérêt à déterminer l'intensité du courant au moment du démarrage (avec un couple résistant donné) d'un moteur muni de sa résistance de démarrage, et d'autre part, on peut également être amené à déterminer la résistance à donner au rhéostat pour que l'intensité soit minimum, le couple étant donné.

Pour effectuer l'essai, on dispose sur la poulie du moteur une sorte de frein dont on serre les mâchoires de manière à ce qu'il soit entraîné. Dans le dispositif indiqué par la figure 48, la poulie est

Fig. 48.



entourée de mâchoires en bois, que l'on serre fortement au moyen des boulons, l'appareil est équilibré, et pour que le bras de levier ne varie pas, le poids P est attaché en a, à la partie supérieure d'une surface cylindrique dont l'axe coïncide avec celui de l'arbre. En B_1 et en B_2 sont deux butées.

Si l'on veut, par exemple, déterminer la résistance que l'on doit employer pour obtenir un couple donné C, on prend $P = \frac{C}{l}$ et l'on diminue peu à peu la résistance intercalée dans l'induit, jusqu'à ce que le poids soit soulevé franchement et que l'appareil vienne buter contre B_2. On mesure alors l'intensité du courant.

§ 4. — Essais de rendement.

Pour les machines de très faible puissance, le frottement des balais a une influence relative très grande, il faut donc bien veiller, lors des essais, à ce que la pression ne soit pas trop forte. Il faut également, dans ce cas, prendre des précautions pour la détermination du t/m. (*voir* p. 4). Les essais de rendement ne doivent également se faire que quand les paliers sont bien chauds, c'est-à-dire quand la dynamo a fonctionné pendant un certain temps (*voir* p. 83).

Les essais de rendement peuvent être effectués par la méthode directe, mais celle-ci est très rarement utilisée pour les génératrices, car elle exige l'emploi d'un dynamomètre de transmission. Ces appareils sont d'un prix élevé et généralement peu précis.

Dans le cas de moteurs de puissance inférieure à 150^{chx} ou 200^{chx}, on peut employer le frein d'absorption; au delà de 200^{chx}, l'installation devient parfois coûteuse et l'on préfère employer d'autres méthodes.

MÉTHODES DIRECTE ET DE SUBSTITUTION.

La feuille modèle n° 5, à la fin du Volume, se rapporte à l'essai au frein d'un moteur série.

Les courbes de la figure 44 (p. 81) donnent les variations des diverses valeurs en fonction du couple C.

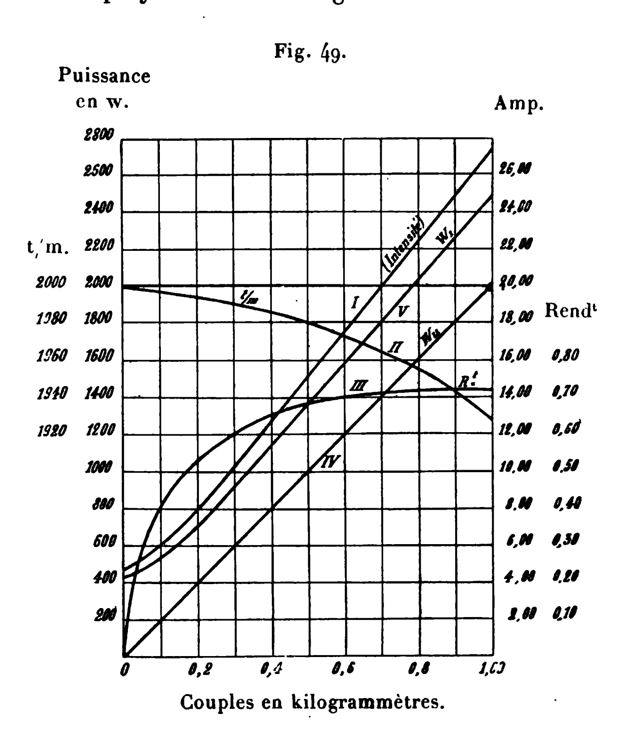
La courbe I est celle de l'intensité du courant I, la courbe II donne le t/m. N, la courbe III la puissance $\varpi = \mathcal{E}I$, la courbe IV la puissance recueillie $\varpi_1 = 1,0273$ C. N. et la courbe V le rendement $\frac{\varpi_1}{\varpi}$.

Les courbes analogues de la figure 49 se rapportent à un moteur excité en dérivation.

Les méthodes de substitution, emploi d'un moteur taré dans le cas

d'une génératrice, ou d'une génératrice tarée dans le cas d'un moteur, peuvent être employées avec avantage.

Fig. 49.



Dans le cas d'emploi de cette méthode pour une génératrice ayant une puissance très faible par rapport à celle du moteur, on peut opérer très simplement. On fait tourner le moteur à vide à la vitesse voulue et l'on note la puissance qu'il absorbe; on lui fait ensuite entraîner la génératrice, en réglant l'excitation de manière à obtenir le même t/m., et l'on note la puissance absorbée; on peut admettre sans grande erreur que la puissance absorbée par la génératrice est égale à la différence des mesures faites. Cette méthode donne des résultats suffisamment exacts quand la puissance normale du moteur est au moins 10 fois plus forte que celle que doit absorber la génératrice. Dans cet essai, le moteur doit être excité par une source indépendante (ou en dérivation, ce qui revient au même) et l'on ne tient pas compte de la puissance absorbée pour l'excitation.

On peut, par exemple, déterminer ainsi les pertes à vide d'une

dynamo, quand on dispose d'une dynamo identique, comme nous le verrons plus loin.

On emploie le plus ordinairement, pour les essais de dynamos, soit la *méthode des pertes séparées,* soit l'une des méthodes de *deux dynamos identiques couplées.*

MÉTHODES DES PERTES SÉPARÉES

Les pertes dans une dynamo peuvent se classer en trois catégories :

1° Pertes pour l'excitation ou puissance nécessaire à l'excitation ;

2° Pertes dues à la résistance intérieure de la machine;

3° Pertes par frottement, résistance de l'air, hystérésis, courants de Foucault.

1° *Puissance perdue pour l'excitation.* — On détermine directement cette puissance, la machine fonctionnant à la charge voulue et au t/m. voulu.

Dans le cas d'une dynamo excitée en dérivation, si ε est la tension aux bornes, et i l'intensité du courant d'excitation, la puissance est εi, c'est-à-dire que l'on doit faire entrer en ligne de compte la puissance perdue dans le rhéostat d'excitation. Si r_e est la résistance du circuit inducteur et r_r la résistance intercalée par le rhéostat, on a :

$$(r_e + r_r)i^2 = \varepsilon i.$$

Dans le cas d'une dynamo série, la perte pour l'excitation se compte dans les pertes dues à la résistance intérieure.

Dans le cas d'une dynamo compound, si r_s est la résistance de l'enroulement série, I l'intensité du courant dans le circuit extérieur et i l'intensité du courant dans le circuit d'excitation en dérivation, on a, pour une génératrice, comme perte dans l'enroulement série $r_s I^2$ et pour un moteur $r_s(I - i)^2$.

Dans le cas où le courant d'excitation est fourni par une excitatrice actionnée par l'arbre de la dynamo principale, les pertes dans cette excitatrice sont généralement comptées dans les pertes pour l'excitation. Dans le cas d'une excitation complètement séparée, il faut bien préciser, si l'on doit tenir compte du rendement de l'excitatrice (qui peut du reste servir pour plusieurs machines), ou

simplement tenir compte de la puissance absorbée dans le circuit d'excitation de la dynamo considérée.

2° *Pertes dues à la résistance intérieure de la machine.* — Si r_a est la résistance de l'induit, e la chute de tension aux balais, pour l'intensité donnée, I l'intensité du courant dans le circuit extérieur et i l'intensité du courant d'excitation dérivé, on a, dans le cas d'une génératrice excitée en dérivation, comme pertes :

$$p_i = r_a(I + i)^2 + e(I + i),$$

et dans le cas d'un moteur :

$$p_i = r_a(I - i)^2 + e(I - i).$$

Dans le cas d'une machine série, si r_s est la résistance de l'enroulement série, on a :

$$p_i = (r_a + r_s)I^2 + eI.$$

Dans le cas d'une dynamo compound, la perte dans l'enroulement série étant comptée avec la perte pour l'excitation, on obtient les pertes intérieures par la même relation que pour le cas d'une dynamo en dérivation.

Comme nous l'avons déjà indiqué (p. 56), la puissance ainsi calculée est inférieure à la puissance perdue réelle, car on ne peut tenir compte de la puissance dissipée par suite de la mise en court-circuit des spires de l'induit, impossible à déterminer.

3° *Pertes par frottement, résistance de l'air, hystérésis et courants de Foucault.* — Ces pertes sont, à très peu de chose près, égales à la puissance que l'on doit fournir à la dynamo pour la faire fonctionner comme moteur à vide au t/m. voulu, à excitation indépendante, avec une f. e. m. égale à celle qu'elle développe à la charge considérée en fonctionnant soit comme génératrice, soit comme moteur (force contre-électromotrice).

Si I_a est l'intensité du courant dans l'induit à la charge considérée, ε la d. d. p. entre les balais, e la chute entre les tiges porte-balais et le collecteur pour l'intensité I et le t/m. voulu, et r_a la résistance de l'induit, on a

$$E = \varepsilon + e + r_a I_a, \text{ dans le cas d'une génératrice,}$$
$$E = \varepsilon - e - r_a I_a, \text{ dans le cas d'un moteur.}$$

Si ε' est la d. d. p. appliquée aux bornes de la dynamo fonctionnant comme moteur à vide à excitation indépendante, dont on règle l'intensité pour avoir le t/m. voulu, et si i' est l'intensité du courant, la f. e. m. est

$$E' = \varepsilon' - e' - r_a i'.$$

e' étant la chute de potentiel entre les tiges porte-balais et le collecteur pour l'intensité i', et le t/m. On devra donc avoir :

$$E = E',$$
$$\varepsilon \pm e \pm r_a I_a = \varepsilon' - e' r_a i',$$
$$\varepsilon' = \varepsilon \pm e \pm r_a I_a + e' + r_a i'.$$

La puissance nécessaire pour faire tourner la dynamo à vide est

$$Ei' = \varepsilon' i' - e' i' - r_a i'^2.$$

Dans certains cas, on peut négliger e' et $r_a i'$, et prendre

$$\varepsilon' = E, \qquad \text{et comme perte} \qquad \varepsilon' i'.$$

On applique alors la tension E aux bornes de la dynamo, et l'on règle l'excitation de manière à avoir le t/m. voulu.

Il vaut mieux tracer une courbe, donnant la valeur de i' en fonction de la d. d. p. appliquée aux bornes, en faisant varier cette d. d. p. au-dessus et au-dessous de ε' (*voir* p. 81).

On obtient une courbe pour i', analogue à celle donnée sur la figure 45 (courbe I) et on peut tracer la courbe de la puissance totale absorbée $\varepsilon i'$ (courbe II, *fig.* 45), et au besoin la courbe des valeurs de Ei'.

Pour des machines à tension normale suffisamment élevée, la courbe représentant $\varepsilon' i'$ se confond pratiquement avec celle de Ei'. On n'a besoin de déterminer E et Ei' que pour des machines à très faible tension, par exemple des dynamos pour électrolyse.

La méthode est sujette à deux causes d'erreur :

1° Les pertes par frottement sont ordinairement plus faibles à vide qu'en charge, particulièrement quand la dynamo est munie d'une courroie.

2° Dans le terme en $r_a I_a^2$ on ne tient pas compte, comme nous l'avons vu, de la perte due à la mise en court-circuit des spires, de

sorte que, pour une génératrice, E est trop faible, ainsi que E′, pour le cas d'un moteur; on prend E′ trop élevé, ce qui compense un peu l'erreur sur $r_a I^2$.

En outre, même en admettant que la f. e. m. dans le fonctionnement à vide soit la même que dans le fonctionnement en charge, c'est-à-dire que les flux totaux soient les mêmes, les pertes par hystérésis ou courants de Foucault sont plus élevées en charge qu'à vide, car, par suite de la réaction d'induit, le flux est moins uniformément réparti en charge qu'à vide. Il est évident que, pour un même flux total, les pertes sont moins grandes dans un champ uniforme que dans un champ non uniforme.

En somme, les pertes mesurées par cette méthode sont ordinairement plus faibles (principalement pour les génératrices) que les pertes réelles, de sorte que les rendements ainsi déterminés sont un peu forts (en général, l'erreur ne dépasse pas 1 à 2 pour 100).

Exemple. — Détermination du rendement à diverses charges, d'une dynamo compound de 360 k. w. à 240 v.

Les essais ont montré que le compoundage maintenait une tension pratiquement constante, de sorte que l'intensité du courant d'excitation, de 21,6 a., ainsi que la perte par excitation

$$21,6 \times 240 = 5184 \text{ w.}$$

en dérivation, restent constantes, quelle que soit la charge.

La résistance intérieure de l'induit (*voir* p. 57) était, à chaud, de 0,0031 Ω et celle de l'enroulement série de 0,00071 Ω.

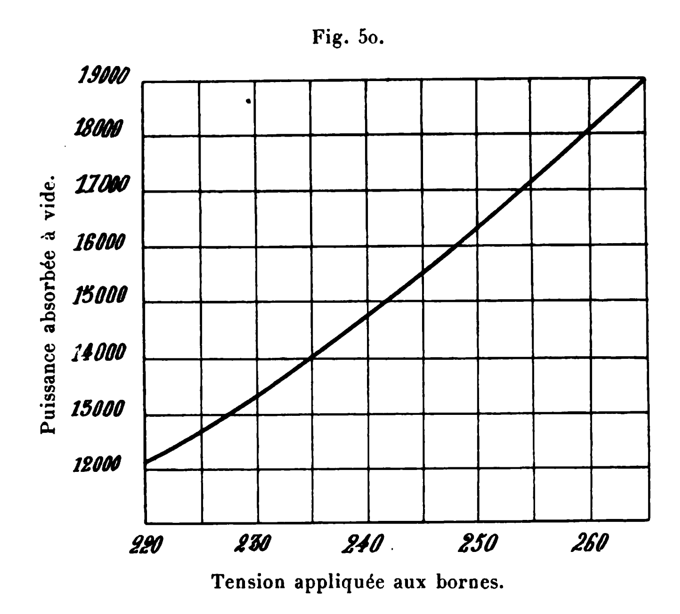
La courbe de la figure 23 (p. 55) donne la chute de tension due à la résistance de contact des balais.

Le Tableau suivant donne les résultats des essais à vide, à 70 t/m. La première colonne indique la d. d. p. ε', appliquée aux porte-balais, la deuxième, l'intensité correspondante i' du courant, la troisième, la puissance totale absorbée $\varepsilon' i'$, la quatrième, la chute aux balais pour l'intensité correspondante, déduite de la courbe de la figure 23, la cinquième, la chute dans l'induit ($0,0031\, i'$), la sixième, la chute totale de tension e', la septième, la f. e. m. $E = \varepsilon' - e'$ et la huitième, la puissance absorbée pour faire tourner la dynamo à vide, c'est-à-dire $E i'$.

D. d. p. appliquée ε'.	Intensité du courant i'.	Puissance totale absorbée $\varepsilon' i'$.	Chute de potentiel due à la résistance de contact des balais.	dans l'induit $r_a i'$.	totale e'.	F. e. m. $E = \varepsilon' - e'$.	Puissance absorbée Ei' pour compenser les pertes.
220	55,2	12144	0,48	0,18	0,66	219,34	12108
230	58,3	13409	0,48	0,19	0,67	229,33	13370
240	61,2	14688	0,49	0,20	0,69	239,31	14646
248	64,5	15996	0,50	0,21	0,71	247,29	15950
261	70,1	18296	0,52	0,23	0,73	260,25	18224

La courbe de la figure 50 est tracée d'après les valeurs indiquées sur ce Tableau, elle donne à la fois la puissance totale absorbée en fonction de la tension ε' aux bornes et la puissance absorbée Ei' pour vaincre les résistances passives, les deux courbes se confondant.

Fig. 50.



Tension appliquée aux bornes.

Le Tableau suivant donne la f. e. m. de la machine aux diverses charges, ainsi que la perte de puissance due aux frottements, à l'hystérésis, pertes dans le fer. La chute de tension, par suite de la résistance des balais, a été déterminée d'après la courbe de la figure 23, et la perte de puissance au moyen de la courbe de la figure 50, suivant la f. e. m.

Indication de la charge watts.	Intensité du courant — dans le circuit exté-rieur I.	Intensité du courant — dans l'induit $I_a = I + 21,6$.	Chute de tension — dans l'induit $r_a I_a$.	Chute de tension — aux balais.	Chute de tension — totale e.	F. e. m. $240 + e$.	Perte de puissance par frottement, etc.
Pleine charge....	1500	1521,6	5,23	1,46	6,69	246,69	15700
$\frac{3}{4}$ de charge.....	1125	1146,6	3,94	1,33	5,27	245,37	15500
$\frac{1}{2}$ id.	750	771,6	2,65	1,20	3,85	243,85	15300
$\frac{1}{4}$ id.	375	393,6	1,36	1,00	2,36	242,36	15100
A vide..........	0	21,6	0,07	0,30	0,37	240,37	14600

Le Tableau suivant donne la perte de puissance dans l'enroulement compound ($0,00072 I^2$), la perte de puissance, constante, pour l'excitation en dérivation ($21,6 \times 240 = 5184$ w.), la perte dans l'induit et les balais $e I_a$, la perte totale et les rendements aux diverses charges.

Indication de la charge.		Pertes de puissance — par frottements, etc.	excitation en dérivation 5184 w.	enroulement compound $0,00072 I^2$.	dans l'induit et les balais $e I_a$.	totale.	Rendements.
Pleine charge	360000 w...	15700	5184	1620	10180	32684	91,7
$\frac{3}{4}$ de charge	270000...	15500	5184	911	6043	27638	90,7
$\frac{1}{2}$ id.	180000...	15300	5184	405	2971	23860	88,2
$\frac{1}{4}$ id.	90000...	15100	5184	101	885	21270	80,8
A vide.................		14600	5184	0	8	19792	0

Si la dynamo est simplement munie d'une excitation en dérivation, on doit déterminer l'intensité du courant pour maintenir la tension constante aux diverses charges.

Quand on a affaire à une dynamo génératrice montée entre deux cylindres d'une machine à vapeur, la puissance perdue par suite des frottements rentre dans les pertes organiques de la machine à vapeur, la dynamo servant de volant ou ajoutant son action à celle de ce dernier. Dans ce cas, si l'on fait la réception de la machine dans les ateliers, on la monte sur des paliers provisoires, on détermine la perte par frottements comme nous le verrons plus loin et on la déduit des pertes à vide.

Quand l'essai se fait la machine étant montée, on peut procéder de la manière suivante : on fait fonctionner le groupe à vide, sans exciter

la dynamo, on relève les diagrammes de la machine à vapeur (*voir* le Chapitre V) et l'on détermine la puissance indiquée. On fait ensuite fonctionner la dynamo à vide mais excitée de manière à donner une f. e. m. correspondant à celle de la charge voulue, on relève de nouveau les diagrammes et l'on détermine la puissance indiquée. La différence des puissances indiquées donne les pertes par hystérésis et courants de Foucault. Si la dynamo est excitée au moyen d'une excitatrice spéciale actionnée par l'arbre de la machine à vapeur, on détermine ainsi en même temps en plus la puissance nécessaire pour l'excitation.

Naturellement, la détermination des pertes à vide peut se faire en actionnant la machine au moyen d'un moteur dont on connaît le rendement. On peut employer comme moteur une machine identique à celle à essayer (*voir* p. 86); ces pertes atteignent au maximum 5 pour 100.

Séparation des pertes à vide. — Il est souvent intéressant de pouvoir séparer les pertes mécaniques des pertes électriques et même au besoin, dans ces dernières, de déterminer la part qui incombe aux courants de Foucault et celle qui incombe à l'hystérésis.

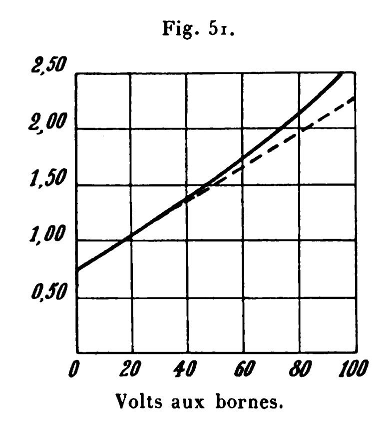
Si l'on veut connaître simplement les pertes mécaniques, on peut le faire d'une manière suffisamment exacte, en traçant la caractéristique à vide comme moteur de la machine à t/m. constant en allant jusqu'à la d. d. p. la plus faible et en traçant la courbe de la puissance absorbée (*fig.* 45, p. 82). En prolongeant la courbe jusqu'à sa rencontre avec l'axe des y, l'ordonnée donne la valeur des pertes mécaniques. D'après la courbe de la figure 45, les pertes mécaniques sont de 200 w. On peut même avec la courbe avoir une idée du rapport des pertes par hystérésis à celles par courants de Foucault. En un point B de la courbe les pertes sont représentées par AB (40 w.). Si l'on suppose qu'elles sont entièrement dues aux courants de Foucault pour une d. d. p. n fois plus forte, elles seront n^2 fois plus fortes. Par exemple, pour 70 v. on a 40 w., pour 140 v. $n = 2$, les pertes seront 4 fois plus fortes ou 160 w. On pourra ainsi tracer la courbe pointillée BD. Si l'on suppose que la perte est due à l'hystérésis pour une d. d. p. n fois plus grande, les pertes seront $n^{1,6}$ fois plus fortes. On pourra donc tracer la courbe pointillée BE. La courbe réelle est comprise entre BD et BE et les distances relatives entre ces courbes donnent une idée du rapport des pertes par hystérésis et des

pertes par courants de Foucault. La Table à la fin du Volume donne les valeurs de $n^{1,6}$ pour diverses valeurs de n.

Les pertes mécaniques peuvent également être déterminées en employant un moteur taré.

Deux méthodes électriques ont été indiquées pour séparer les pertes par hystérésis de celles par courants de Foucault, mais elles ne sont pas tout à fait exactes, car on admet dans leur emploi que les pertes mécaniques sont proportionnelles au t/m., ce qui n'est pas exact, ainsi que l'a montré M. Dettmar. Les pertes mécaniques augmentent plus rapidement que la vitesse; la courbe de la figure 51 relevée par

Fig. 51.



Volts aux bornes.

M. Dettmar donnant les pertes mécaniques en fonction de la d. d. p. aux bornes, c'est-à-dire de la vitesse, montre le fait; si la perte était proportionnelle à la vitesse, on aurait la droite indiquée en traits pointillés.

Quoique les méthodes électriques ne donnent pas des résultats tout à fait exacts, elles sont cependant souvent employées à cause de leur simplicité : l'une est due à M. Mordey, l'autre à M. Housman.

Méthode de Mordey. — On détermine, en actionnant la dynamo par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission ou d'un moteur taré, les pertes à vide w à N t/m., puis w' à N' t/m., l'excitation étant choisie de manière à avoir la f. e. m. voulue. Les pertes par hystérésis et frottements étant proportionnelles au t/m. et celles par courants de Foucault au carré du t/m.; on peut poser

$$w = a\mathrm{N}^2 + b\,\mathrm{N},$$
$$w' = a\mathrm{N}'^2 + b'\mathrm{N},$$

d'où l'on tire

$$a = \frac{w N' - w' N}{N^2 N' - N N'^2},$$

$$b = \frac{w N'^2 - w' N^2}{N N'^2 - N^2 N'};$$

$a N^2$ représente les pertes dues aux courants de Foucault au t/m. normal, bN celles dues à l'hystérésis également au t/m. normal. Pour obtenir des valeurs exactes, on peut déterminer les pertes mécaniques w_m à N t/m. et celles w'_m à N' t/m. (soit en faisant actionner la machine non excitée par le moteur taré, soit en traçant les courbes analogues à celle de la figure 44), les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont alors

aN t/m........................ $w - w_p$
aN$_1$ t/m........................ $w' - w'_p$

On déterminera ensuite a, qui représente les pertes par courants de Foucault par tour et b qui ne représente plus alors que les pertes par hystérésis par tour, en remplaçant, dans les équations données ci-dessus, w par $w - w_p$ et w' par $w' - w'_p$.

Méthode de M. Housman. — Cette méthode permet de séparer les pertes par courants de Foucault des autres, en faisant simplement fonctionner la machine comme moteur à vide.

Pour cela on maintient l'excitation constante, de manière à avoir pour la tension E le t/m. normal, puis on fait varier la tension aux bornes en mesurant chaque fois l'intensité du courant et le t/m.

En prenant le t/m. comme abscisses et la tension appliquée aux bornes comme ordonnées, on obtient une courbe différant très peu d'une droite passant par l'origine; on mène cette droite OA (*fig.* 52). Si ε est la valeur de la d. d. p., en posant $\varepsilon = kN$, on peut déterminer k ($k = 0{,}061\,N$ sur la figure).

On trace ensuite la courbe de l'intensité en fonction du t/m. qui peut être également remplacée par une droite BC, que l'on trace.

On a, en effet, en admettant que les pertes par frottement sont proportionnelles au t/m. :

$$Ei = aN + bN^2,$$

$$kNi = aN + bN^2,$$

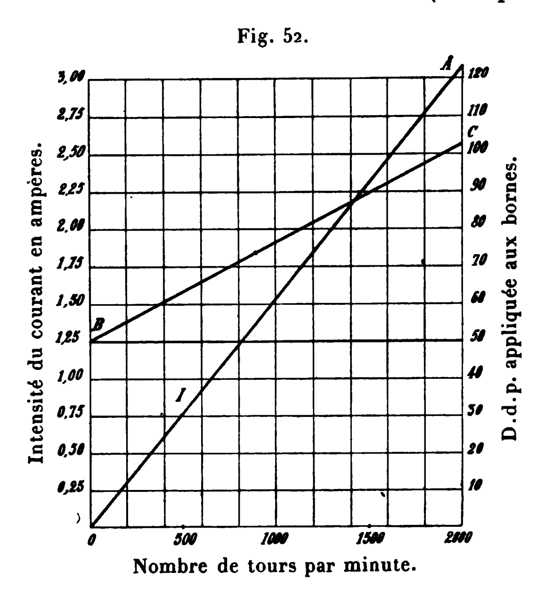
$$i = \frac{a}{k} + \frac{b}{k} N_1 = 1{,}25 + 0{,}00066\,N.$$

En traçant l'horizontale passant par B, il est facile de voir que OB représente $\frac{b}{k}$ et l'ordonnée comprise entre l'horizontale et BC représente $\frac{a}{k}$. On peut donc ainsi déterminer a et b et, par conséquent, séparer les pertes par courant de Foucault, bN^2 des autres. Sur la courbe on a :

$$w = 0,07625\,N + 0,00001026\,N^2.$$

La séparation des pertes peut s'effectuer d'une manière très exacte par la *méthode du lancer* ou d'amortissement (*voir* p. 6).

Fig. 52.



On lance la dynamo non excitée à une vitesse supérieure à la normale et l'on trace; la courbe représente à chaque instant la vitesse (ou t/m.) en fonction du temps écoulé, on obtient ainsi la courbe I de la figure 53.

Si pour lancer la dynamo on la fait fonctionner comme moteur à vide, il faut avoir bien soin de la lancer à une vitesse beaucoup plus considérable que la vitesse normale; on coupe alors d'abord le courant principal, puis ensuite immédiatement après le courant d'excitation. Comme par suite de la self-induction de l'enroulement inducteur ce courant ne cesse pas brusquement, il faut lancer à une vitesse beaucoup plus grande que la normale pour être bien sûr que le cou-

rant d'excitation a cessé au moment où cette vitesse est atteinte. Il vaut même mieux, autant que possible, lancer la machine au moyen d'une courroie et d'un petit moteur auxiliaire.

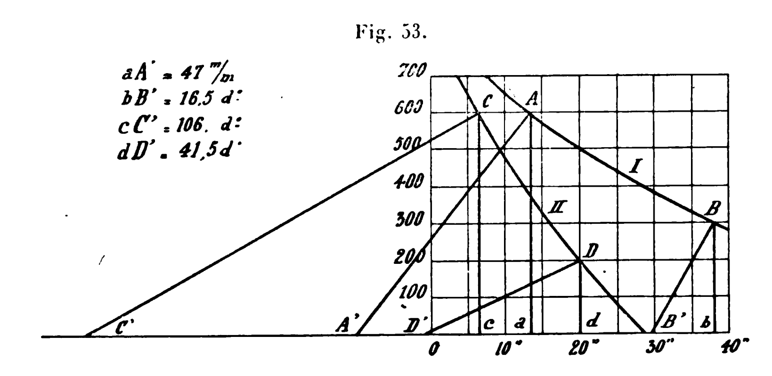
On procède ensuite au lancer; mais, en excitant la dynamo à la valeur nécessaire pour obtenir E au t/m. normal et en maintenant pendant toute la durée de l'essai le courant d'excitation bien constant, on relève ainsi la courbe II.

Pour trouver la constante par laquelle il faut multiplier la sous-tangente (en un point correspondant à un t/m. donné) pour avoir le travail résistant, on peut déterminer directement ce travail en faisant tourner la dynamo comme moteur à vide; on obtient ainsi E*i* (*voir* p. 89), et de cette valeur on déduit la constante par laquelle il faut multiplier la longueur de la sous-normale.

Comme vérification on peut déterminer la constante de la même manière pour un autre t/m. et, par conséquent, une autre valeur de la tension et voir si les deux valeurs coïncident bien. Il vaut mieux du reste prendre la moyenne de plusieurs essais.

La courbe nº 1 permet alors de déterminer l'effort résistant mécanique pour les t/m. correspondant à ceux des essais entrepris pour déterminer la constante. On est alors dans les mêmes conditions que lors de l'essai d'après la méthode de Mordey, modifiée pour tenir

Fig. 53.



compte de la non proportionnalité de l'effort résistant mécanique avec le t/m. (p. 95) et les équations données permettent de séparer les pertes par hystérésis des pertes par courants de Foucault.

Les courbes de la figure 52 qui se rapportent à une dynamo de 40 k. w. à 600 t/m. ont été tracées en se servant d'un v. m. comme

tachymètre (*voir* p. 7). Car, même quand la dynamo n'est pas excitée, le magnétisme rémanent induit une f. e. m. que l'on peut mesurer avec un v. m. approprié.

La sous-tangente au point A, courbe I à 600 t/m., est de 47^{mm} et correspond aux pertes mécaniques à 600 t/m.; celle au point B, courbe I à 300 t/m., est de $16^{mm},5$, elle correspond aux pertes à vide à 300 t/m.; celle au point C, courbe II à 600 t/m., est de 106^{mm}, elle correspond aux pertes à vide, la dynamo étant excitée normalement (donnant E à la vitesse normale); celle du point D, courbe II à 300 t/m., est de $41^{mm},5$, elle correspond aux pertes totales à 300 t/m. Les essais à vide avec l'excitation normale ont donné : A 600 t/m.,

$$\varepsilon' i' = 950 \text{ w.}$$

et à 300 t/m.,

$$\varepsilon' i' = 359 \text{ w.},$$

107^{mm} correspondent donc à 950 w. ou 1^{mm} à 9 w.

$41^{mm},5$ correspondent donc à 359 w. ou 1^{mm} à 8,65 w.

La moyenne d'essais à des vitesses différentes a donné 8,8 w.

A vide, sans excitation, la perte par frottements à 600 t/m. est donc de :

$$47 \times 8,8 = 414 \text{ w.},$$

et, à 300 t/m., de :

$$16,5 \times 8,8 = 145 \text{ w.}$$

Les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont donc, à 600 t/m.,

$$950 - 414 = 536 \text{ w.}$$

à 300 t/m.,

$$359 - 145 = 214 \text{ w.}$$

On a donc :

$$w = 536, \qquad N = 600, \qquad N' = 300,$$
$$w' = 214, \qquad N^2 = 360\,000, \qquad N'^2 = 90\,000,$$
$$a = \frac{wN' - w'N}{N^2N' - NN'^2} = \frac{536 \times 300 - 214 \times 600}{360\,000 \times 300 - 90\,000 \times 600} = \frac{324}{540\,000},$$

Les pertes par courants de Foucault à 600 t/m. sont donc :

$$aN^2 = \frac{324 \times 360\,000}{540\,000} = 216 \text{ w.}$$

Les pertes par hystérésis sont de :

$$536 - 216 = 320 \text{ w.}$$

MÉTHODES DES DYNAMOS IDENTIQUES COUPLÉES.

Les deux machines sont couplées de manière à avoir leurs arbres solidaires; pour cela il faut éviter l'emploi d'une courroie, dont le rendement est très difficile à déterminer et qui, en outre, a l'inconvénient de permettre un glissement, c'est-à-dire que les deux arbres peuvent alors avoir des vitesses un peu différentes. Il faut placer les deux arbres bout en bout et les relier par une liaison élastique, un manchon Raffard par exemple, ou, si l'on a affaire à des machines de faible puissance, par un simple ressort à boudin dont chacune des extrémités est fixée à l'un des arbres au moyen d'un collier et de vis de pression. Il faut éviter l'accouplement rigide, car dans ce cas, si les deux arbres ne sont pas exactement dans le prolongement l'un de l'autre, condition très difficile à réaliser, on a des frottements supplémentaires et par conséquent perte d'énergie.

L'une des machines fonctionne comme moteur et l'autre comme génératrice.

Le principe de la méthode est dû à M. Fontaine qui actionnait le moteur par une source d'énergie électrique et absorbait l'énergie fournie par la génératrice dans des résistances.

Si w_m est la puissance fournie au moteur et w_g celle recueillie à la génératrice, quand la première machine fonctionne un peu au-dessus de la charge et la génératrice un peu au-dessous, on peut admettre que le rendement d'une des machines est donné par la relation

$$\mathcal{R} = \sqrt{\frac{w_g}{w_m}}.$$

Il faut, pour pouvoir employer cette relation : 1° que les pertes dans les dynamos soient faibles, sans cela le rendement comme moteur diffère beaucoup du rendement comme génératrice; 2° que la variation du rendement en fonction de la charge soit faible, ce qui se présente ordinairement quand les machines fonctionnent à peu près à pleine charge. On voit que dans la méthode de M. Fontaine on doit disposer d'une source d'énergie électrique dont la puissance est plus élevée que la puissance normale des machines et que l'on consomme beaucoup d'énergie en pure perte.

Pour obvier à cette difficulté, M. Hopkinson a eu l'idée d'em-

ployer le courant de la génératrice à faire fonctionner le moteur, de sorte que la source auxiliaire n'a besoin que d'avoir la puissance correspondant aux pertes des deux machines. La méthode d'Hopkinson, ainsi que les autres basées sur le même principe, sont désignées sous le nom de *méthodes d'opposition*.

Dans toutes les méthodes d'opposition il faut monter les dynamos, de manière à ce que leurs f. e. m. soient opposées; la meilleure manière pour éviter des erreurs de montage est de mettre en marche le groupe, puis, au moyen d'un v. m. à aimant, de déterminer les signes des bornes de chacune d'elles et de relier directement les bornes de même signe.

Quand on a affaire à des dynamos à excitation en série, il faut absolument les exciter au moyen d'une source indépendante.

Dans le cas de dynamos à excitation en dérivation, on peut au besoin intercaler dans les circuits d'excitation des rhéostats bien réglables, mais il est cependant plus commode d'employer des excitations séparées.

Les liaisons électriques entre les machines doivent être autant que possible effectuées au moyen de conducteurs de grande section, afin de pouvoir négliger la perte due à leur résistance; si on ne le peut, il faut tenir compte de cette perte dans les calculs et la déduire de la puissance fournie au groupe.

Soient ε_g la d. d. p. de la dynamo fonctionnant comme génératrice, ε_m celle de la dynamo fonctionnant comme moteur, I_g et I_m les intensités des courants dans les induits, et E_g et E_m les f. e. m. déterminées comme il a été indiqué (au moyen de la courbe donnant la chute de tension entre porte-balais en fonction de l'intensité du courant d'induit, p. 58).

Pour une détermination sommaire des pertes et, par conséquent, du rendement, on peut procéder de la manière suivante :

Le groupe ayant le t/m. normal, on règle de manière que la moyenne des f. e. m. des deux machines soit égale à la f. e. m. normale (à la charge voulue) calculée comme il a été indiqué (p. 88), et que la moyenne des intensités soit égale à l'intensité normale (en tenant compte au besoin, dans le cas de dynamos excitées en dérivation, de l'intensité d'excitation). On a ainsi :

$$\frac{E_m + E_g}{2} = E_n, \qquad \frac{I_m + I_g}{2} = I_n.$$

La somme w_p des pertes dans les deux machines est donnée par la puissance fournie par la ou par les sources auxiliaires d'énergie. On admet que la perte pour la dynamo fonctionnant à la charge voulue $(\varepsilon_n I_n)$ est égale à $\frac{w_p}{2}$, et, en tenant compte de la puissance nécessaire à l'excitation, on détermine le rendement.

On peut obtenir les pertes pour une charge donnée avec une très grande précision en combinant la méthode d'opposition avec celle des pertes séparées.

On trace, comme il est indiqué dans la méthode des pertes séparées : 1° la courbe donnant la chute de tension entre balais en fonction de l'intensité du courant d'induit (p. 58); 2° la courbe donnant la puissance nécessaire pour faire fonctionner la dynamo à vide, au t/m. voulu, en fonction de la f. e. m. appliquée aux bornes (p. 82).

On procède à l'essai en faisant tourner le groupe au t/m. voulu et en faisant fonctionner soit la génératrice, soit le moteur à sa puissance normale, suivant que l'on procède à l'essai soit en génératrice, soit en moteur. (Dans le cas d'essai comme génératrice, on prend $\varepsilon_g = \varepsilon_n$, $I_g = I_n$, et dans le cas d'essai comme moteur, $\varepsilon_m = \varepsilon_n$ et $I_m = I_n$.)

Au moyen de la première courbe, on détermine e_g et e_m, les chutes de tension dans les induits, et l'on a :

$$E_g = \varepsilon_g + e_g, \qquad E_m = \varepsilon_m - e_m.$$

On détermine sur la courbe des puissances à vide la puissance w_g correspondant à E_g et la puissance w_m correspondant à E_m.

La puissance perdue dans les deux machines, déterminée par la méthode des pertes séparées, est

$$w'_p = e_g I_g + e_m I_m + w_g + w_m.$$

La puissance totale perdue w_p est égale à la puissance fournie par la ou par les sources auxiliaires d'énergie.

On peut admettre que la différence $w_p - w'_p$ se répartit entre les deux machines proportionnellement à leurs charges, de sorte que, pour la génératrice, on doit ajouter aux pertes déterminées par la méthode des pertes séparées la valeur

$$w'_g = \frac{(w_p - w'_p)\varepsilon_g I_g}{\varepsilon_g I_g + \varepsilon_m I_m},$$

et que pour le moteur on doit ajouter :

$$w'_m = \frac{(w_p - w'_p)\varepsilon_m I_m}{\varepsilon_g I_g + \varepsilon_m I_m}.$$

La perte totale dans la génératrice est alors :

$$e_g I_g + w_g + w'_g + w_{gc},$$

w_{gc} étant la puissance nécessaire pour l'excitation. Dans le moteur la perte totale est :

$$e_m I_m + w_m + w'_m + w_{me},$$

w_{me} étant la puissance nécessaire pour l'excitation. On peut du reste avoir une idée de l'erreur que l'on a pu commettre en supposant d'autre part que la perte $w_p - w'_p$, non mesurée par la méthode des pertes séparées, se répartit également entre les deux machines.

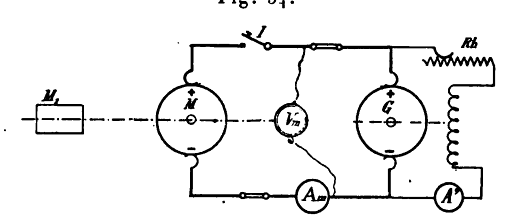
Méthode d'Hopkinson. — On actionne le groupe des deux machines, soit en le commandant par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission, soit en le commandant directement par un moteur taré.

On détermine la puissance correspondant aux pertes dans les deux machines, soit d'après les indications du dynamomètre, soit d'après la puissance fournie au moteur taré.

On a dans ce cas :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_m, \qquad I_g = I_m.$$

Fig. 54.



La méthode peut très bien être employée pour le tracé de la caractéristique de la machine génératrice et, dans ce cas, naturellement le moteur n'a pas besoin d'être taré.

La figure 54 donne le schéma de montage pour un essai par la méthode Hopkinson. M_1 est le moteur auxiliaire, M la machine fonctionnant comme moteur et G celle fonctionnant comme génératrice.

Cette méthode permet d'essayer la dynamo soit comme moteur, soit comme génératrice à toutes charges.

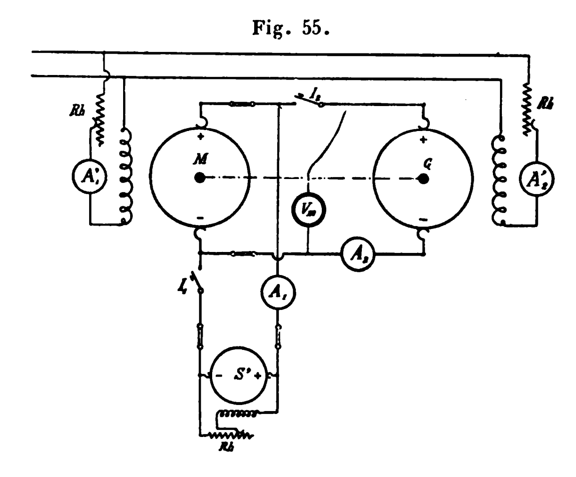
Il est nécessaire de procéder avec prudence au réglage des excitations; en effet, la résistance des deux induits est très faible, et une différence un peu forte des f. e. m. $E_g - E_m$ provoquerait la circulation d'un courant d'intensité dangereux.

Méthode Rayleigh et Kapp. — Au lieu d'employer un moteur auxiliaire, Lord Rayleigh et M. Kapp fournissent la puissance supplémentaire aux bornes de la machine fonctionnant comme moteur.

La source auxiliaire d'électricité peut être une batterie d'accumulateurs dont on fait varier la tension en faisant varier le nombre d'éléments ou en intercalant un rhéostat. On peut également employer une dynamo comme source d'électricité, et faire varier la tension en agissant sur son excitation.

La figure 55 donne le schéma de montage pour un essai d'après cette méthode, la source auxiliaire étant la génératrice S et les deux dynamos à essayer étant excitées par une source indépendante.

Fig. 55.



L'intensité du courant fourni par la dynamo auxiliaire est indiquée par l'a. m. A_1, celle du courant supplémentaire de la dynamo génératrice par l'a. m. A_2.

On met d'abord le groupe en marche, en faisant tourner le moteur au moyen de la source auxiliaire, puis on excite la génératrice jusqu'à ce que sa tension soit un peu supérieure à la tension aux bornes

du moteur. On ferme ensuite l'interrupteur I_2 et l'on règle les excitations. On a pour cette méthode :

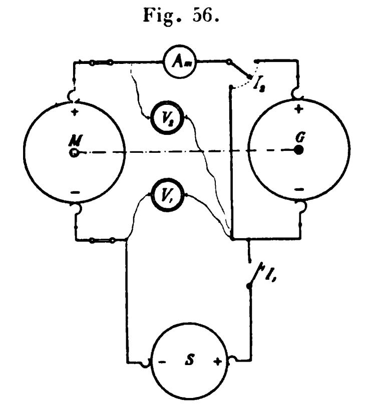
$$\varepsilon_m = \varepsilon_g, \qquad I_m = I_g + I_1,$$

I_1 étant l'intensité du courant fourni par la source auxiliaire. La somme des pertes est $\varepsilon_g I_1$. On peut essayer la dynamo comme génératrice à toutes charges, mais pas comme moteur.

Méthode de M. Potier. — Dans la méthode précédente la source auxiliaire est mise en somme en parallèle avec la génératrice; dans la méthode indiquée par M. Potier, la source est mise en tension avec cette dernière. L'intensité du courant est alors la même dans les deux dynamos (fonctionnant à excitation indépendante).

La figure 56 donne le schéma de montage. Les machines étant

Fig. 56.



excitées par une source indépendante (non représentée), la source auxiliaire est supposée être une génératrice S, dont on peut régler à volonté la tension. L'interrupteur I_2 peut fermer le circuit entre les machines M et G ou entre la source auxiliaire et la machine fonctionnant comme moteur.

On fait démarrer le moteur M au moyen de la source auxiliaire en manœuvrant l'interrupteur I_2, de manière à relier directement S et M. Puis l'ensemble ayant pris une certaine vitesse (en agissant sur l'excitation de M), on déplace l'interrupteur I_2 de manière à relier G à M. On manœuvre alors les rhéostats pour obtenir les tensions et les intensités voulues.

On a alors

$$\varepsilon_m = \varepsilon_g + \varepsilon_s,$$

ε_s étant la tension de la source auxiliaire,

$$I_m = I_g.$$

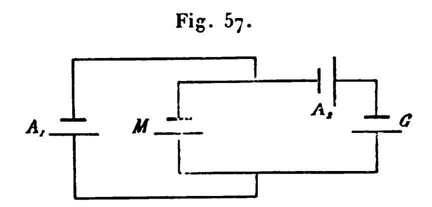
La somme des pertes est $\varepsilon_s I_g$.

Cette méthode ne permet pas l'essai à vide, car la source doit toujours fournir un courant d'une certaine intensité pour actionner l'ensemble.

Méthode de M. Hutchinson. — C'est la combinaison des deux méthodes précédentes. M. Hutchinson emploie deux sources auxiliaires d'électricité, l'une mise en parallèle avec la machine fonctionnant comme génératrice, l'autre en série avec cette dernière.

La figure 57 donne le schéma de la méthode; la source A_1 est mise en parallèle avec G et la source A_2 ajoute sa tension à celle de G.

Fig. 57.



Si ε_1 et I_1 sont la d. d. p. et l'intensité de la source A_1 (mise en parallèle avec la génératrice) et ε_2, I_2 les valeurs correspondantes pour la source A_2 (placée en série), on a

$$\varepsilon_m = \varepsilon_g + \varepsilon_2 = \varepsilon_1, \qquad I_m = I_g + I_1, \qquad I_2 = I_g.$$

La perte totale est

$$\varepsilon_1 I_1 + \varepsilon_2 I_2 = \varepsilon_m I_1 + \varepsilon_2 I_g.$$

Cette méthode permet d'employer dans le moteur une intensité moindre que dans le cas de la méthode de lord Rayleigh et Kapp, et de le soumettre à une tension moindre que dans la méthode de M. Potier.

Par contre, le réglage des intensités et des tensions est beaucoup plus délicat.

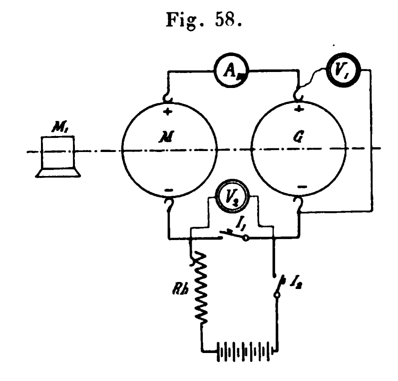
Méthode de M. Blondel. — C'est une combinaison de la méthode Hopkinson et de la méthode Potier.

Le groupe est actionné par un moteur taré ou par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission et une source d'électricité est mise en série avec la génératrice.

Il est facile de voir que le moteur auxiliaire fournit la puissance nécessaire pour vaincre les pertes mécaniques, par hystérésis et courants de Foucault, tandis que la source auxiliaire d'électricité fournit la puissance nécessaire pour faire circuler le courant dans les deux induits, c'est-à-dire pour vaincre la résistance des circuits intérieurs.

La figure 58 donne le schéma de montage pour l'application de la

Fig. 58.



méthode de M. Blondel, les machines étant à excitations indépendantes (non représentées).

Cette méthode permet de déterminer très exactement les pertes dues à la résistance intérieure des machines. On lance le groupe au moyen du moteur auxiliaire M_1 au t/m. voulu, puis les balais de chacune des machines étant placés, soit exactement dans la ligne neutre, soit avec le même décalage (avant pour la génératrice, arrière pour le moteur, afin que la réaction d'induit soit tout à fait la même pour les deux machines), on ferme l'interrupteur I_1 (I_2 étant naturellement ouvert) et l'on manœuvre les rhéostats d'excitation jusqu'à ce qu'aucun courant ne circule dans le circuit (l'a. m. étant au o); on ouvre alors l'interrupteur I_1, on ferme rapidement I_2 et l'on manœuvre le rhéostat R_h de manière que l'a. m. indique le courant d'intensité voulue i. Si le v. m. branché aux bornes de la source

indique e v., la puissance nécessaire pour faire circuler le courant dans les deux induits est ei, la chute dans chaque machine est $\frac{e}{2}$.

L'emploi des méthodes d'opposition est tout indiqué pour les essais des moteurs de tramways. On spécifie alors dans le cahier des charges que le rendement des moteurs sera déterminé en les accouplant par leur pignon et la roue dentée montée sur l'essieu, en tenant compte dans le rendement des pertes dans les engrenages et du frottement de l'essieu.

CHAPITRE IV.

ESSAIS DES MACHINES A COURANT ALTERNATIF.

Généralités.

RÉSISTANCE DE CONTACT DES BALAIS ET DES BAGUES.

La détermination de la résistance ou de la chute de tension due au double contact est très facile à faire. Il suffit d'envoyer un courant d'une certaine intensité et de mesurer la d. d. p. entre les balais, la résistance de la bague étant négligeable.

M. Dettmar dans ses essais a reconnu que la résistance de contact est très variable, la moindre vibration, le passage d'une voiture même éloignée par exemple, peut faire varier subitement la résistance de 20 à 30 pour 100.

La résistance de contact pour les balais métalliques est très faible, la chute de potentiel due au double contact atteint au maximum 0,20 v. Elle est toujours plus élevée quand la bague tourne que lorsqu'elle est au repos.

Quand on mesure la résistance d'un circuit aboutissant à des bagues, même quand les balais sont métalliques, il faut avoir bien soin de ne pas mesurer la chute entre les balais, mais bien entre les bagues, en se servant du dispositif indiqué page 43 (*fig.* 20).

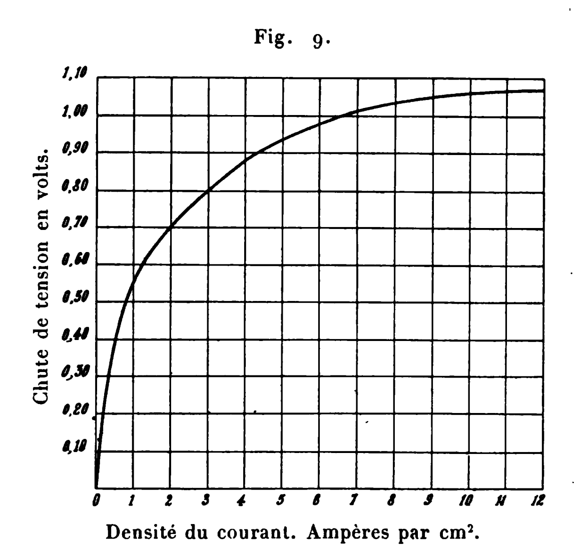
La résistance de contact des balais en charbon est plus élevée et parfois (dans les machines à faible tension) il faut tenir compte de la chute de tension due à cette résistance, qui pour le double contact peut atteindre 1,20 v.

On peut facilement procéder à la mesure, la machine étant en marche, en appliquant l'une des pointes reliée à l'une des extrémités du circuit d'un v. m. sur le porte-balais et en touchant la bague avec la pointe reliée à l'autre extrémité (ou mieux en reliant cette extrémité à un petit balai). On a ainsi la chute de tension due à l'une

des résistances de contact (il faut naturellement doubler pour avoir la chute totale).

La courbe de la figure 59 donne pour des balais en charbon la

Fig. 9.



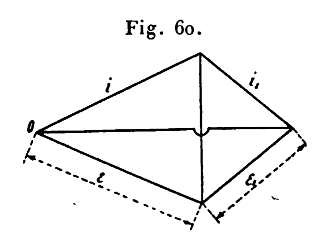
Densité du courant. Ampères par cm².

variation de la chute due au double contact en fonction de l'intensité du courant, la pression des balais sur la bague et la vitesse de cette dernière étant restées constantes pendant la durée de l'expérience.

RÉSISTANCE INTÉRIEURE DES CIRCUITS TRIPHASÉS.

Les circuits triphasés peuvent être montés soit en triangle, soit en étoile. Si (*fig.* 60) I est l'intensité dans une phase et ε la tension étoilée, dans le cas où les charges sont uniformément réparties,

Fig. 60.



si I_1 représente l'intensité dans le cas du triangle, et ε_1 la tension

entre deux sommets du triangle, ou tension composée, ou tension entre deux phases, on a les relations

$$I = \sqrt{3} I_1 = 1{,}732 I_1,$$
$$\varepsilon_1 = \sqrt{3}\varepsilon = 1{,}732\,\varepsilon.$$

La Table n° 2 à la fin du volume permet de déduire la valeur de I_1 de celle de I ou réciproquement, ainsi que la valeur de ε_1 de celle de ε.

Quand on a un enroulement triphasé, on ne peut mesurer directement que la résistance r, entre deux bornes, la résistance r_1 par phase est :

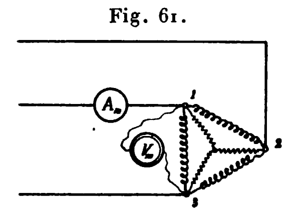
$r_1 = \frac{r}{2}$ dans le cas d'un enroulement en étoile.

$r_1 = \frac{3r}{2}$ » » en triangle.

Il faut donc connaître le mode d'enroulement pour pouvoir déterminer la résistance par phase, mais il suffit de connaître la résistance r entre deux bornes pour déterminer la chute de tension et la perte de puissance due à la résistance intérieure.

Si (*fig.* 61) I est l'intensité du courant mesurée dans une phase,

Fig. 61.



quand les charges sont égales dans les trois phases, la chute de tension composée (ou entre deux phases) est :

$$e = \frac{\sqrt{3}\,rI}{2} = 0{,}866\,rI.$$

La perte de puissance est :

$$w = \frac{3}{2} rI^2 = 1{,}50\,rI^2,$$

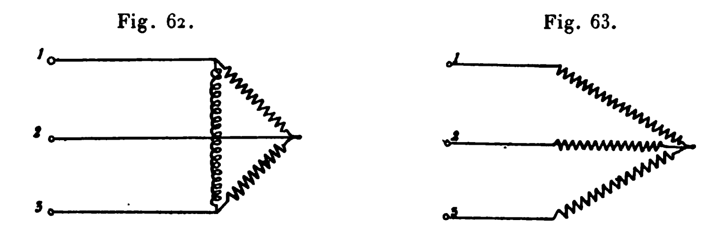
r étant la résistance mesurée entre deux bornes, soit 1 et 2, soit 2 et 3, soit 1 et 3.

DISPOSITION DES CIRCUITS D'UTILISATION DANS LE CAS DE COURANTS TRIPHASÉS.

Il est souvent difficile d'obtenir une charge bien uniforme dans le cas des courants triphasés.

On arrive dans tous les cas plus facilement à l'équilibre pratique des trois phases, en plaçant les rhéostats, bobines à réaction, etc., en triangle (*fig.* 62) qu'en les plaçant en étoile (*fig.* 63).

Fig. 62. Fig. 63.



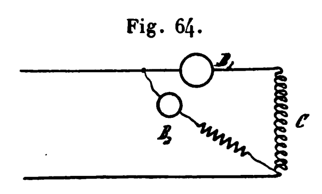
Ce dernier montage peut par contre être employé avec succès, quand l'on veut étudier l'influence des différences de charge.

MESURE DE LA PUISSANCE DANS LES CIRCUITS TRIPHASÉS.

Quoique cela ne rentre pas dans le cadre de notre Ouvrage, nous croyons cependant devoir rappeler le montage des w. m. pour le cas des courants triphasés.

On sait que, suivant les cas, on doit brancher le circuit à fil fin (dérivation) soit en amont de la bobine à gros fil (série) comme l'indique la figure 64, soit en aval, figure 65. Le premier cas (montage

Fig. 64.

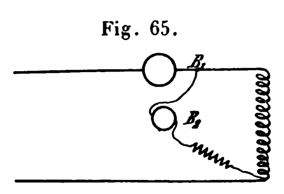


amont) est à employer quand la tension est élevée, l'erreur est RI^2 (R résistance de la bobine série, I intensité du courant), B_1 est la bobine à gros fil, B_2 la bobine en dérivation.

Le deuxième cas (montage aval figure 65) doit être employé quand la tension est faible, le w. m. mesure en trop la quantité $\frac{\varepsilon^2}{r}$, ε étant

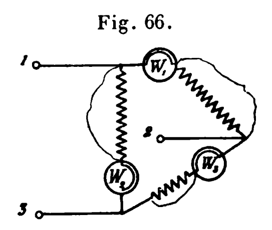
la tension, *r* la résistance du circuit en dérivation. On peut du reste au besoin dans l'un ou l'autre cas tenir compte de l'erreur commise. Dans certaines mesures très précises il faut tenir compte du facteur de correction (voir *L'Éclairage électrique,* t. XVI, p. 525).

Fig. 65.



Dans le cas de mesure de courants triphasés on peut employer trois w. m., montés comme l'indique la figure 66 ; pour le montage

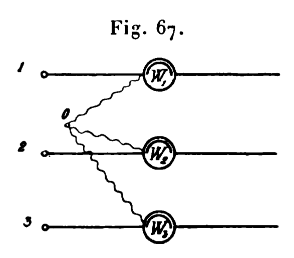
Fig. 66.



en triangle, un seul w. m. peut suffire pour le cas où les charges sont égales dans les trois circuits.

On peut également monter les w. m. en étoile comme l'indique la figure 67, mais il faut alors que les trois circuits à fil fin des trois

Fig. 67.



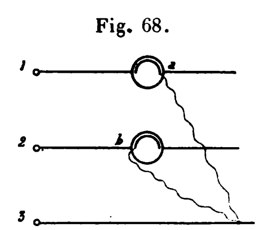
appareils soient absolument identiques, sans cela, on n'aurait pas une tension nulle au point O, réunion des extrémités des trois circuits à fil fin.

Dans le cas où les charges sont égales on peut n'employer qu'un w. m., mais les deux résistances supplémentaires à placer pour

obtenir le centre O de l'étoile doivent être identiques au circuit à fil fin du w. m.

On peut également mesurer la puissance dans un circuit triphasé au moyen de 2 w. m. montés comme l'indique la figure 68. (Dans

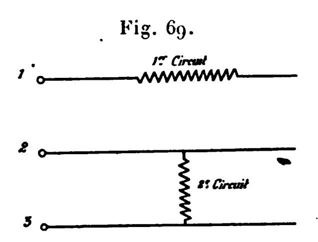
Fig. 68.



ce cas, si la puissance à mesurer est relativement faible, on a intérêt, afin que les dérivations dans les circuits à fils fins des w. m. n'entraînent pas des perturbations, à employer 2 w. m. identiques et à relier les points *a* et *b* par une résistance identique aux circuits à fil fin de ces deux w. m.).

La puissance totale est égale à la somme algébrique des puissances indiquées par les w. m. La puissance indiquée par un des w. m. est négative (son indication doit être retranchée de celle de l'autre) si le décalage est plus grand que $\frac{\pi}{3}$, ce qui se produit rarement en pratique. Quand on procède à des essais successifs, on remarque vite si l'on doit retrancher les indications d'un des w. m.; en effet, quand

Fig. 69.



on augmente la charge, si les indications de l'un d'eux diminuent on doit retrancher la puissance indiquée par cet appareil; si, au contraire, les indications augmentent, on doit ajouter. Si l'on ne fait pas des essais successifs, on peut procéder comme il suit. On place un des w. m., on note le sens de la déviation, puis on le monte à la place de l'autre, en le disposant d'une manière analogue. Si la dévia-

tion est de même sens que précédemment on doit ajouter les données des deux w. m.; dans le cas contraire il faut retrancher.

Dans certains essais, on a besoin de courants décalés de $\frac{\pi}{2}$ dans deux circuits; on peut naturellement employer des courants diphasés, mais si l'on a à sa disposition un circuit triphasé on peut opérer de la manière suivante : l'un des circuits est branché dans l'une des phases du circuit triphasé (*fig.* 69) et l'autre entre les deux autres phases; il est facile de voir que les deux courants sont alors décalés de $\frac{\pi}{2}$.

Essais de fonctionnement.

TRACÉ DES COURBES REPRÉSENTATIVES DU COURANT ET DES TENSIONS.

Il est très important de connaître la forme de la courbe du courant ou de la tension d'une machine, car les pertes dans le fer des appareils et la tension maximum (correspondant à une tension efficace donnée) à laquelle sont soumis les isolants en dépendent.

L'on a imaginé divers appareils donnant directement le tracé de ces courbes, tels que l'*oscillographe* de M. Blondel (voir *L'Éclairage électrique,* t. XII, p. 349), le *rhéographe* de M. Abraham (voir le *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens,* t. XIV, 1897, p. 397) et l'*ondographe* de M. Hospitalier (voir l'*Industrie Électrique* du 10 juillet 1901).

Si l'on n'a pas un de ces appareils à sa disposition, on peut relever la courbe par points d'après la méthode des contacts instantanés due à M. Joubert [1] (1880).

On emploie un interrupteur tournant synchroniquement avec le courant et établissant à un moment donné un contact instantané, le moment du contact pouvant varier à volonté.

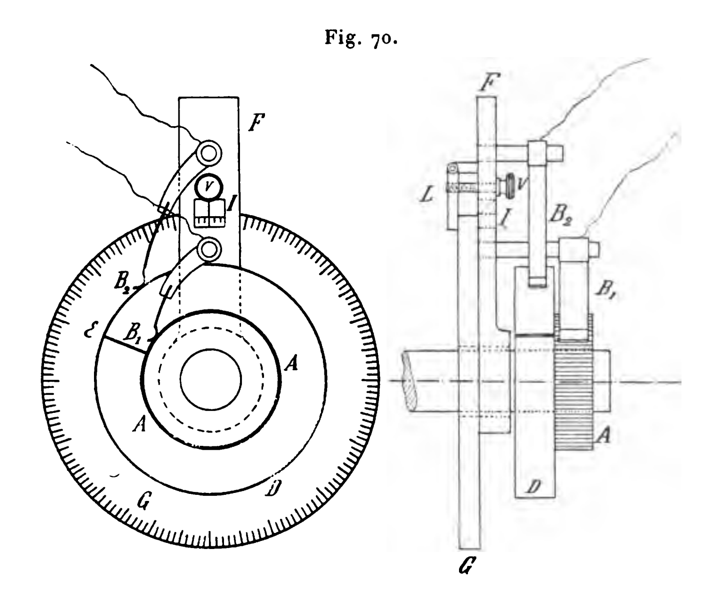
Le meilleur moyen quand on le peut est de placer directement l'appareil sur l'arbre de l'alternateur produisant le courant; si on ne le peut, on le dispose sur l'arbre d'un moteur synchrone actionné par ce dernier. On peut également, comme l'a fait M. Ryan, com-

[1] M. Franke de Hannovre construit des appareils permettant de relever très rapidement les courbes par points. Voir *Zeitschrift für Instrumenten Kunde*, janvier 1901.

mander l'appareil par un flexible. La première disposition est la meilleure, car on est absolument sûr de la position correspondant au moment du contact. Avec un flexible il peut y avoir une légère torsion, et avec un moteur synchrone, il peut y avoir un léger décalage, car un tel moteur peut avoir des variations de vitesse dans un tour.

L'appareil des contacts instantanés peut être construit de la manière suivante (*fig.* 70).

Fig. 70.



Deux cercles isolés sont montés sur l'arbre de la machine (ou sur l'arbre commandé par le flexible) et entraînés par lui; l'un A, porte à sa surface extérieure un cercle de cuivre, l'autre D a sa surface extérieure constituée par une matière isolante (fibre, ébonite, etc.).

Sur chacune des roues frotte un petit balai B_1 ou B_2 et sur la périphérie de D est placée, suivant une génératrice, une lame mince d'acier ou de cuivre E, reliée électriquement à la bague en cuivre placée sous la roue A, de manière que, chaque fois que E passe sous le balai B_2, les balais B_1 et B_2 soient reliés électriquement.

Pour que le contact se fasse bien, il faut que la lame E_1 dépasse à peine la surface extérieure du disque D, afin d'éviter autant que possible de faire vibrer le balai B_2.

Si la lame E est en cuivre, il faut avoir soin de creuser de part et d'autre deux petites rainures, afin d'éviter l'élargissement du contact par suite de la métallisation de la surface de l'ébonite ou de la fibre près de la lame. Les balais peuvent être formés de petites lames de cuivre recourbées, fixées aux extrémités de tiges en cuivre; les deux cercles A et D peuvent avoir le même diamètre ou des diamètres différents.

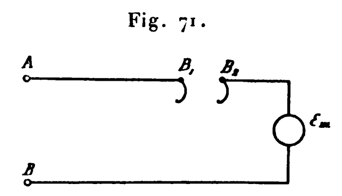
Pour pouvoir déplacer le balais D tout en déterminant sa position par rapport à l'alternateur, on le fixe à un bras F, qui peut tourner autour de l'axe de la machine et qui porte un index I se déplaçant devant un cercle fixe gradué G; une vis de pression V permet de serrer, par l'intermédiaire d'une lame L qu'elle attire, le bras F contre le cercle G, et de maintenir le balai B_2 dans une position déterminée pendant la durée d'une mesure.

Pour plus de commodité dans le montage, le balai B_1, qui naturellement pourrait être fixe, est monté sur le bras F (dont il est comme le balai B_2 isolé). De petites bornes permettent de relier les balais à des conducteurs en cuivre.

Quand l'alternateur (ou le moteur synchrone) comporte plusieurs paires de pôles, on peut placer sur le cercle isolé D un nombre de contacts égal au nombre p de paires de pôles, faisant entre eux des angles de $\frac{360}{p}$ degrés; on obtient ainsi un plus grand nombre de contacts par seconde.

Quand le balai B_2 est fixé en un point déterminé, on peut mesurer la d. d. p. pour le point de la courbe correspondant à la position du balai, par l'une des trois méthodes suivantes.

Fig. 71.



Si A et B (*fig.* 71) sont les bornes de l'alternateur, ou les bornes de la résistance sans self-induction (dans le cas où l'on veut relever la courbe de l'intensité du courant), on relie la borne A au balai B_1, la borne B_2 à une des bornes d'un électromètre ε_m et l'autre borne

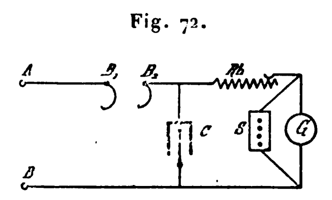
de ce dernier directement à B. L'électromètre indique alors la d.d.p. voulue.

Comme il est très difficile d'avoir un électromètre permettant de mesurer de très petites d. d. p., on n'emploie pas ordinairement ce procédé.

M. Joubert a indiqué le procédé suivant, qui permet de se servir, pour la mesure, d'un galvanomètre qui doit seulement remplir la condition d'avoir une durée d'oscillation plus grande que l'intervalle de temps entre deux contacts successifs.

On relie la borne A (*fig.* 72) au balai B_1 et le balai B_2 par l'in-

Fig. 72.



termédiaire du rhéostat Rh à une des bornes d'un galvanomètre G muni d'un shunt réglable S ; l'autre borne du galvanomètre est reliée à la borne B et l'on place en dérivation sur le circuit un condensateur C.

Un condensateur de 0,01 à 0,1 microfarad suffit ordinairement pour que l'on obtienne des déplacements bien fixes au galvanomètre ; l'amplitude de ces déplacements peut être réglée en agissant sur le rhéostat Rh et le shunt S. On peut employer soit un galvanomètre du genre Desprez-d'Arsonval, soit un balistique ; dans ce dernier cas la mesure est très précise, mais elle exige un certain temps avant que l'appareil vienne au repos.

Pour étalonner l'appareil, il suffit de placer entre les bornes A et B une source d'électricité à courant continu, dont on connaît la tension, puis de faire tourner l'appareil au même t/m. que dans le cas de la mesure de la d. d. p. instantanée. L'indication du galvanomètre correspond alors à la tension connue du courant continu.

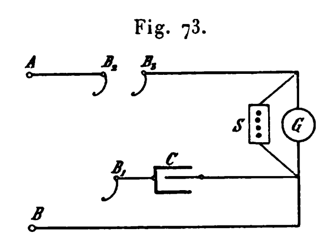
M. Blondel a indiqué une autre méthode qui permet également d'obtenir de bons résulats.

On monte sur le bras mobile F un troisième balai B_3, frottant sur le cercle D, mais de telle sorte qu'il ne vienne pas au

contact des lames telles que E (quand il y en a plusieurs) au même moment que le balai B_2.

La borne A (*fig.* 73) est reliée au balai B_2, et le balai B_1 à l'une des bornes d'un condensateur dont l'autre borne est reliée à B. La

Fig. 73.



borne B_3 est mise en relation par l'intermédiaire du galvanomètre G, shunté, avec la borne B.

Il est facile de voir que chaque fois que le contact E passe sous le balai B_2 le condensateur se charge, tandis que chaque fois que ce contact passe sous le balai B_3, le condensateur se décharge à travers le galvanomètre.

Quand la résistance du shunt S ne dépasse pas deux à trois fois la résistance du galvanomètre, il suffit de quinze contacts par seconde (le nombre de contacts est égal à la fréquence du courant quand il y a autant de pièces de contact E que de paires de pôles) pour obtenir une déviation fixe avec un galvanomètre ayant une période d'oscillation de $\frac{1}{2}$ à 1 seconde.

L'étalonnage du galvanomètre se fait comme pour la méthode indiquée précédemment, au moyen d'un courant continu de d. d. p. connue, l'appareil tournant à la vitesse voulue.

Pour tracer la courbe de la d. d. p. d'un alternateur, on branche l'appareil aux bornes de ce dernier; pour tracer la courbe de l'intensité on le branche aux bornes d'une résistance sans self-induction.

On place l'index du bras mobile sur une division du cercle gradué, on fixe le bras au moyen de la vis de pression et l'on détermine la déviation correspondante du galvanomètre; on déplace ensuite le bras, en le faisant avancer dans un sens ou dans l'autre de l'angle voulu, on le fixe de nouveau, on relève la déviation du galvanomètre; on continue ainsi, toujours dans le même sens, en avançant toujours du même angle, jusqu'à ce que l'on ait parcouru un cercle entier,

dans le cas d'une machine bipolaire, ou $\frac{360}{p}$ degrés dans le cas d'une machine ayant p paires de pôles.

Quand l'appareil est commandé par un moteur synchrone bipolaire, si l'on avance chaque fois de 3°, on obtient 120 points de la courbe, la première et la cent vingt et unième mesure devant coïncider.

L'inconvénient de l'emploi de la méthode est sa longue durée pendant laquelle les conditions de l'essai ne doivent pas varier.

Quand on a relevé les diverses déviations, on détermine les d. d. p. et l'on trace la courbe.

Quand le tracé de la courbe est effectué, on peut déterminer les harmoniques par les méthodes connues.

ESSAIS DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES ALTERNATEURS.

On doit naturellement procéder aux essais de régularité de fonctionnement, voir si, par exemple, le réglage du courant d'excitation permet d'obtenir dans les limites de charge et de facteur de puissance voulus, la d. d. p. normale aux bornes, et, dans le cas où l'alternateur est compoundé, si le compoundage est bien efficace dans toutes les circonstances. Dans certains cas, pour des alternateurs polyphasés, on a à étudier l'influence de l'inégale répartition des charges dans les circuits sur la d. d. p. aux bornes.

Le tracé de la caractéristique à vide, donnant la relation entre la f. e. m. à vide et l'intensité du courant d'excitation ou les ampères-tours d'excitation, se fait exactement comme celui des machines à courant continu, les courbes obtenues ont la même allure (*voir* p. 67 et *fig.* 31).

Pour les caractéristiques en charge, le t/m. (c'est-à-dire la fréquence) étant constant, on a quatre variables :

1° L'intensité du courant d'excitation;
2° La d. d. p. aux bornes;
3° L'intensité du courant principal;
4° Le facteur de puissance.

En maintenant deux de ces quantités constantes, on obtient la caractéristique ou relation entre les deux autres.

Le tracé des caractéristiques en charge est souvent très difficile à faire, pour des machines de grande puissance, qui ordinairement fonctionnent comme volants des machines à vapeur et ne peuvent être essayées complètement à l'usine ; il est également très délicat dans le cas de très hautes tensions. On emploie dans ce cas-là des transformations de mesures, et même souvent on est obligé, comme on ne pourrait faire fonctionner des résistances sous de très hautes tensions, d'employer des transformateurs et de charger le secondaire de ces derniers; on tient ensuite compte, au besoin, du rendement des transformateurs.

Quand on emploie des résistances liquides, il faut se souvenir que ces résistances peuvent avoir de la capacité.

Pour obtenir des décalages très grands, on prend des bobines à réaction; en employant des conducteurs de très grande section, on peut arriver à obtenir des décalages qu'en pratique on peut admettre comme étant de $\frac{\pi}{2}$ (90°).

Le facteur de puissance se détermine par des relevés simultanés au w. m. à l'a. m. et au v. m.; si w est la puissance mesurée, ε la d. d. p. efficace et I l'intensité efficace, on a pour le facteur de puissance ou $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{w}{\varepsilon I}.$$

On peut arriver à tracer avec une exactitude suffisante toutes les caractéristiques, connaissant celle à vide, celle en court-circuit, et un point d'une des caractéristiques en charge, correspondant à une charge apparente très élevée, la charge effective étant aussi faible que possible, c'est-à-dire à un facteur de puissance très faible.

Caractéristique en court-circuit. — M. Behn-Eschenburg, ingénieur de la Société d'Œrlikon, a le premier signalé l'importance de cette caractéristique. Elle donne la relation entre l'intensité du courant de court-circuit et l'intensité du courant d'excitation (ou, ce qui revient au même, les ampères-tours).

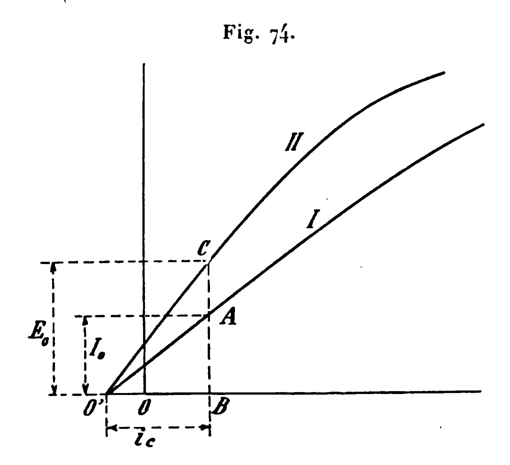
Pour tracer cette caractéristique on procède comme il suit: on relie directement aux bornes de la machine un a. m. de très faible résistance.

On fait tourner l'alternateur au t/m. normal sans l'exciter, et l'on

note l'intensité du courant dû au magnétisme rémanent, on augmente ensuite peu à peu l'excitation et l'on note pour chaque valeur de cette dernière la valeur de l'intensité du courant.

On trace ensuite la courbe, en prenant pour abscisse l'intensité du courant d'excitation (ou les ampères-tours) et pour ordonnée l'intensité correspondante dans l'induit. On obtient ainsi une courbe I (*fig.* 74) qui, pour des excitations pas trop élevées, se confond

Fig. 74.



généralement avec une droite ne passant pas par l'origine. Si l'on rapporte ensuite la courbe de la f. e. m. à vide II, qui pour de faibles excitations est également une droite, ces deux droites se coupent en un point O' sur l'axe des x. Le point O' correspond au champ magnétique nul que l'on pourrait obtenir par des ampères-tours négatifs.

Dans le cas de machines avec enroulement placé dans des trous, la caractéristique en court-circuit s'incurve parfois légèrement à l'origine, la résistance apparente est alors plus grande pour un très faible courant de court-circuit que pour un courant normal. M. Guilbert [1] attribue cela au fait que, pour de faibles excitations, les isthmes ne sont pas saturés.

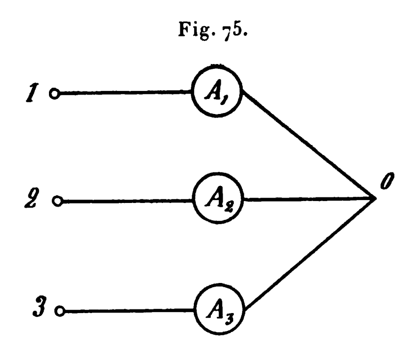
Dans le cas d'un alternateur diphasé, la caractéristique à vide se trace en plaçant soit un a. m. dans chaque phase, soit en plaçant

---

[1] *Les générateurs d'électricité à l'Exposition de* 1900, par M. C.-F. GUILBERT.

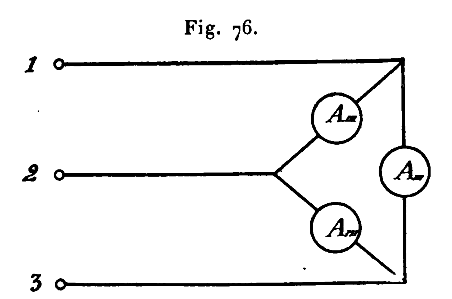
un a. m. dans une des phases et en reliant les bornes de l'autre par un conducteur de grande section. Dans le cas d'un alternateur triphasé, on peut employer trois a. m. et les disposer en étoile comme

Fig. 75.



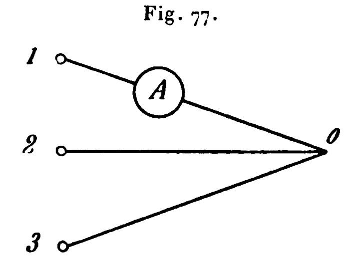
l'indique la figure 75. On ne peut guère les disposer en triangle (*fig.* 76), car alors il faudrait que leurs résistances soient absolument

Fig. 76.



égales et avoir en outre des résistances de contact absolument iden-

Fig. 77.

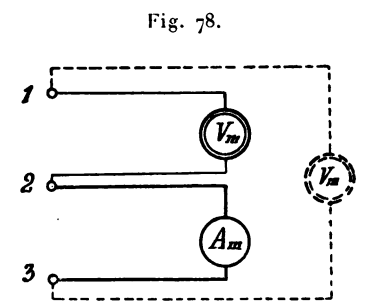


tiques, ce qui est à peu près impossible à obtenir. On peut également disposer un a. m. dans une des phases (*fig.* 77) et relier les deux

autres bornes directement au centre O par des câbles de grande section. Le montage en triangle est impossible avec un seul a. m., celui-ci serait shunté par une résistance à peu près nulle.

Dans le cas de machine polyphasée, on peut également, pour étudier les réactions des phases les unes sur les autres dans le cas de phases non également chargées, ne court-circuiter que l'une des phases, l'autre ou les autres restant libres. La figure 78 montre le

Fig. 78.



montage, pour le tracé de la caractéristique en court-circuit d'une seule phase d'un alternateur triphasé. On obtient ainsi à faible excitation une droite passant par le point O′ (*fig.* 74); on peut en outre relever la caractéristique à vide sur les phases non circuitées et voir l'influence de la réaction d'une phase sur l'autre. On obtient pour les mêmes intensités d'excitation des f. e. m. inférieures à celles obtenues quand aucune phase n'est en court-circuit.

En pratique, une bonne machine doit donner, en court-circuit, l'intensité normale (correspondant à la pleine charge) avec une excitation correspondant à celle donnant à vide le tiers environ de la tension normale.

M. Behn Eschenburg a indiqué une méthode permettant de déduire des caractéristiques à vide et en court-circuit l'intensité du courant d'excitation nécessaire pour obtenir aux bornes de l'alternateur une d. d. p. donnée, avec un courant d'intensité et un facteur de puissance donnés.

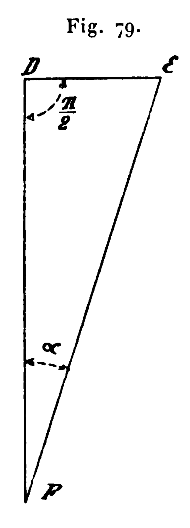
Dans cette méthode on suppose que la chute de tension dans l'induit est uniquement due à la résistance ohmique et à la self-induction.

On détermine sur la caractéristique en court-circuit (*fig.* 74) le point A correspondant à l'intensité voulue I, et l'on mène l'or-

donnée BA qui coupe la caractéristique à vide en C. Puisque la d. d. p. aux bornes est nulle, BC représente la chute de tension.

Pour trouver la chute due à la self-induction (ωLI) on prend (*fig.* 79) DE $\#$ r_aI [1], r_a étant la résistance intérieure de l'induit

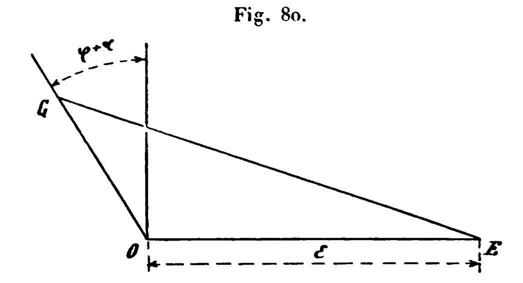
Fig. 79.



(augmentée au besoin de la résistance de l'a. m., si cette dernière n'est pas comme à l'ordinaire négligeable). On mène DF perpendiculaire et l'on prend εF $\#$ BC [1], DF représente alors à l'échelle donnée la valeur de ωLI, on détermine ainsi l'angle α qui, en général, est très petit.

Pour obtenir la f. e. m. correspondant à la d. d. p. ε aux bornes,

Fig. 80.



à l'intensité I du courant et à un facteur de puissance cosφ, on pro-

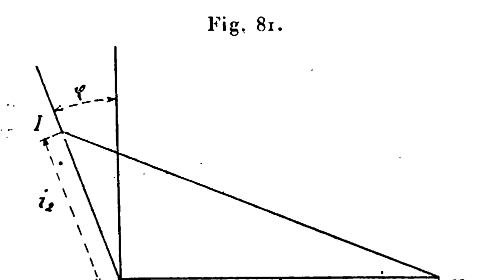
---

(1) Le signe $\#$ signifie proportionnel à.

cède de la manière suivante : on prend (*fig.* 80) OE $\#$ ε, on mène la ligne OG faisant avec la perpendiculaire en O sur OE l'angle $\varphi + \alpha$ et l'on prend OG $\#$ BC. GE représente la f. e. m. et l'intensité nécessaire pour l'excitation se détermine sur la caractéristique à vide.

M. Rothert a proposé le diagramme suivant, dans le tracé duquel on admet en somme que la chute de tension est entièrement due à la réaction d'induit : on prend OH (*fig.* 81) proportionnel à

Fig. 81.



l'intensité du courant d'excitation i, augmenté au besoin de OO' (*fig.* 74)] correspondant d'après la caractéristique à vide à la d. d. p. ε; on mène la ligne OI, faisant avec la perpendiculaire à OH l'angle φ et l'on prend OI $\#$ i_c. IH représente l'intensité du courant d'excitation en charge.

La méthode Behn Eschenburg donne en général des valeurs trop grandes pour l'excitation, et la méthode Rothert, des valeurs trop faibles; il y a cependant des cas particuliers où les choses sont inversées (*voir* à ce sujet une étude de M. Fischer Hinnen parue dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de 1901, cahier 52).

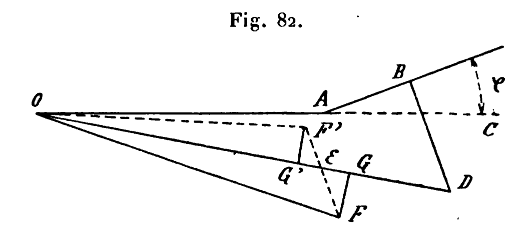
On voit donc que les deux caractéristiques ne suffisent pas pour pouvoir déterminer avec une certaine précision la valeur de l'intensité du courant d'excitation nécessaire pour une charge quelconque (inductive ou non) donnée, c'est-à-dire pour pouvoir tracer au besoin toutes les caractéristiques en charge. Il suffit cependant, pour arriver à le faire avec une précision suffisante, de connaître en outre, pour une d. d. p., une intensité et un facteur de puissance donnés, l'intensité du courant d'excitation. Il faut que le décalage soit très grand et que l'intensité d'excitation dépasse notablement le coude de la caractéristique à vide. On doit donc faire un essai avec une charge aussi inductive que possible, c'est-à-dire avec une charge

effective très faible; le mieux est de tâcher d'employer des bobines à réaction à résistance négligeable, c'est-à-dire d'obtenir une valeur de φ pratiquement égale à $\frac{\pi}{2}$. Dans ces conditions, la puissance motrice nécessaire pour procéder à l'essai est relativement faible et l'on peut l'exécuter à l'atelier en commandant l'alternateur par un moteur beaucoup plus faible que celui qui doit l'actionner plus tard.

M. Potier, dans un article paru dans l'*Éclairage électrique* du 28 juillet 1900, a montré qu'il suffit de connaître, outre la caractéristique à vide, deux constantes de la machine, pour pouvoir déterminer avec précision toutes les caractéristiques en charge. M. Potier a désigné ces constantes par les lettres λ et α, λ correspond à la self-induction de la machine et α à la réaction d'induit (*voir* du reste dans l'article précité de M. Potier la signification précise de ces constantes).

Ces deux constantes, comme nous le verrons plus loin, peuvent être déterminées quand on a les deux caractéristiques précitées et un point d'une caractéristique à charge très inductive. Quand on a la valeur des deux constantes, le diagramme de la figure 82 montre

Fig. 82.



comme l'on peut déterminer l'intensité *i* d'excitation nécessaire pour avoir une tension ε aux bornes, un courant I avec un $\cos\varphi$ donné.

On prend OA $\#$ ε, et l'on fait $\widehat{BAC} = \varphi$, AB $\#$ r_aI (r_aI étant la chute due à la résistance ohmique de l'induit). On mène BD perpendiculaire à AB et l'on prend BD $\#$ λI. On cherche, sur la caractéristique à vide, l'intensité i_1 du courant d'excitation pour avoir une f. e. m. égale à OD (mesuré à l'échelle). On prend à une échelle quelconque OE $\#$ i_1, et l'on mène EF parallèle à BD, on prend EF $\#$ αI et l'on mène par F la perpendiculaire FG à OD, et OG représente à l'échelle adoptée l'intensité du courant d'excitation cherchée.

Cette construction s'applique au cas où I est décalé en arrière de ε. Dans le cas de décalage avant, on prend EF′ $\#$ αI et OG′ représente l'intensité du courant d'excitation cherchée.

Ayant tracé les caractéristiques à vide et en court-circuit et ayant i pour ε, I et $\cos\varphi$, on peut procéder de la manière suivante pour déterminer λ et α, quand $\cos\varphi$ (tout en étant très petit) diffère de o.

Dans la partie en ligne droite de la caractéristique à vide, on a :

$$E = fi,$$

E étant la f. e. m., f une constante et i l'intensité du courant [en prenant au besoin pour origine O′ au lieu de O (*fig.* 74), c'est-à-dire en tenant compte de l'intensité correspondant au magnétisme rémanent].

Dans la partie en ligne droite de la caractéristique en court-circuit on a :

$$I = ki,$$

I étant l'intensité du courant de court-circuit et k une constante.

f et k sont des constantes faciles à déterminer au moyen des caractéristiques.

Lors du fonctionnement en court-circuit, la d. d. p. aux bornes est nulle : Si i est l'intensité du courant d'excitation correspondant à une intensité I, l'intensité d'excitation réelle sera :

$$i - \alpha I,$$

αI représentant la réaction d'induit, et la f. e. m. sera :

$$f(i - \alpha I).$$

Cette f. e. m. est tout entière dépensée à faire circuler le courant dans l'induit, c'est-à-dire à vaincre la résistance apparente. Comme la chute de potentiel due à la résistance ohmique est en quadrature avec la chute λI (1) due à la self-induction et en outre très faible, on a :

$$f(i - \alpha I) = \lambda I,$$

(1) On a, si ω est la pulsation du courant, $\lambda = \omega L$, L étant le coefficient de self-induction que l'on peut déterminer connaissant λ.

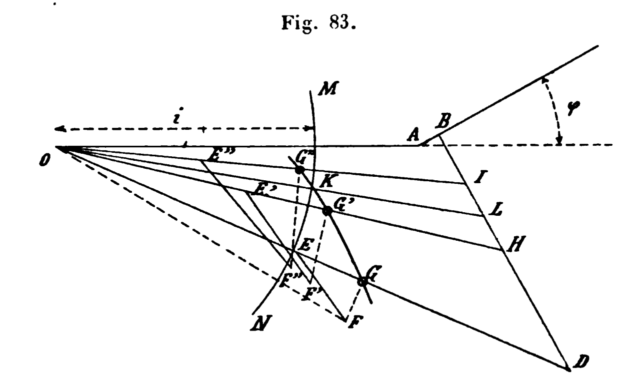


ou, en remplaçant i par $\frac{I}{k}$,

$$\lambda I + f\alpha I = \frac{f}{k} I. \tag{1}$$

On a donc une première relation entre λ et α et l'on détermine ensuite leurs valeurs respectives par approximations successives. On prend (*fig.* 83) OA $\#$ ε et l'on fait $\widehat{BAC} = \varphi$ et AB $\#$ $r_a I$ ($r_a I$ étant

Fig. 83.



la chute de tension due à la résistance ohmique de l'induit). On mène BD perpendiculaire à AB. Du point O comme centre avec un rayon OD $\#$ E, on trace un cercle qui coupe la droite BD en D. E est la f. e. m. qui correspond, sur la caractéristique à vide, à l'intensité i de l'excitation en charge. On joint O à D par une droite.

On trace ensuite de O comme centre, à une échelle convenable, un cercle MN de rayon OE $\#$ i.

On mesure à l'échelle des tensions la valeur de BD qui est égale à $\lambda' I$ et l'on détermine la valeur correspondante de $\alpha' I$, au moyen de la relation (1).

On mène EF parallèle à BD, on prend à l'échelle des intensités EF $\#$ $\alpha' I$, on abaisse de F la perpendiculaire sur OD et l'on détermine ainsi le point G.

On prend ensuite un point H entre B et D et l'on détermine la valeur correspondante de $\lambda'' I$ (BH $\#$ $\lambda'' I$) et l'on tire la valeur correspondante α'' de (1). Au moyen de la caractéristique à vide, on détermine la valeur i'' du courant d'excitation correspondant à la tension représentée par OH. On prend à l'échelle des intensités OE' $\#$ i'', on

mène par E′ une parallèle à BD et l'on prend $E'F' \# \lambda'' I$ et mène par F′ la perpendiculaire FG′ à OH.

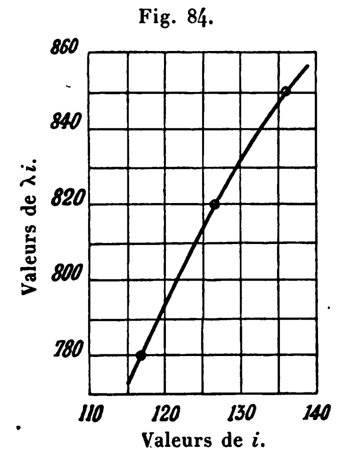
On procède de même pour divers autres points tels que I compris entre B et D, on détermine le point G″, etc. On trace ensuite une courbe reliant les points G, G′, G″, ..., et l'on détermine le point K où cette courbe coupe le cercle MN.

On joint O à K et l'on prolonge cette droite jusqu'à sa rencontre en L avec BD, on a alors $BL \# \lambda I$ et αI se détermine au moyen de la relation (1).

On vérifie alors en employant le mode de construction indiqué si l'intensité d'excitation est bien i.

Dans le cas où l'on a $\cos\varphi = 0$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, cette méthode ne peut plus être employée, on peut alors déterminer λ et α de la manière suivante :

Fig. 84.



Pour $\cos\varphi = 0$, on peut négliger la chute due à la résistance ohmique qui est décalée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension; on a alors, si E représente la f. e. m. induite et ε la tension aux bornes,

$$\varepsilon = E - \lambda I.$$

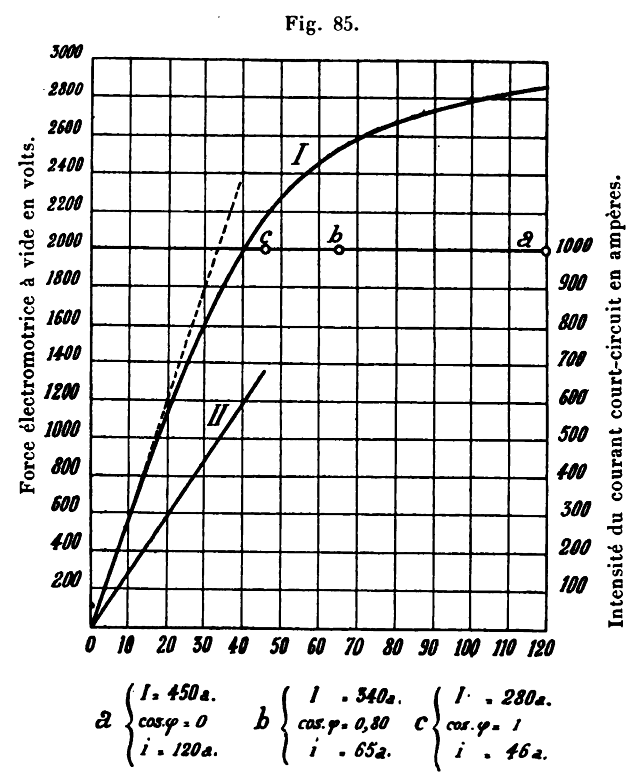
La f. e. m. induite est due à un courant d'excitation d'une intensité $i - \alpha I$, et l'on a

$$E = f_1(i - \alpha I);$$

mais comme la caractéristique à vide n'est plus une droite, dans la région considérée, car on a dépassé le coude de cette dernière,

f_1 n'est plus une constante, et l'on doit procéder à des approximations successives. On prend d'abord $i - \alpha I = i_1$, i_1 étant la valeur de l'excitation pour l'intensité et la d. d. p. données avec $\cos\varphi = 0$.

Fig. 85.



Intensité du courant d'excitation.

On détermine, sur la caractéristique à vide, la valeur E′ de la f. e. m. correspondant à i_1 et l'on a :

$$\lambda' I = E' - \varepsilon,$$

au moyen de la relation (1) on détermine la valeur correspondante $\alpha' I$ et l'on a :

$$i' = i_1 + \alpha' I.$$

On prend ensuite pour $i - \alpha i$ une valeur un peu inférieure à i_1, on détermine sur la caractéristique à vide la f. e. m. correspondante E″ et l'on a :

$$\lambda'' I = E'' - \varepsilon.$$

On tire de (1) la valeur correspondante $\alpha''I$ et l'on a :

$$i'' = i'_1 + \alpha'' I.$$

On procède ainsi en prenant divers points, de manière à obtenir pour i des valeurs inférieures à i_1.

On trace ensuite (*fig.* 84) la courbe des valeurs de $\lambda' I$, $\lambda'' I$, ..., en fonction de i', i'', ... On prend sur cette courbe la valeur de λI correspondant à i_1, qui est la valeur cherchée. On détermine la valeur correspondante de αI et l'on vérifie si les valeurs trouvées sont bien exactes, c'est-à-dire si la valeur de E correspondant, sur la caractéristique à vide, à l'intensité d'excitation $i_1 - \alpha I$ satisfait bien à la relation

$$\varepsilon = E - \lambda I.$$

Exemple. — M. H. Wagner a donné dans l'*Electrotechnische Zeitschrift*, du 22 février 1900, les caractéristiques à vide (courbe I, *fig.* 85) et en court-circuit (courbe II) d'une dynamo des ateliers de construction d'Œrlikon, ainsi que les diverses données relatives à trois charges, comme l'indique le Tableau ci-dessous :

Désignation des points.	Intensité du courant.	D. d. p. aux bornes ε.	Valeur du facteur de puissance cos φ.	Intensité du courant d'excitation.
	a.			a.
c	280	2000	1	46
b	340	2000	0,80	65
a	450	2000	0	120

Sur la caractéristique à vide, pour une excitation de 10 a., on a 600 v., on a donc (en négligeant OO', *fig.* 74)

$$E_V = fi = \frac{600}{10} i = 60 i, \qquad f = 60.$$

Sur la caractéristique en court-circuit, on a, pour 20 a. d'excitation, $I_c = 300$ a. On a donc :

$$I_c = ki = \frac{300}{20} i = 15 i, \qquad k = 15.$$

Pour $I = 450$ a., la relation (1) sera :

$$(1) \qquad \lambda I + 60 \alpha I = \frac{60 \times 450}{15} = 1800,$$

et l'on aura :

$$\alpha I = \frac{1800 - \lambda I}{62}.$$

Premier point.

$$i = 120, \quad E' = 2840, \quad \lambda' I = 2860 - 2000 = 840,$$

$$\alpha' I = \frac{1800 - 840}{60} = \frac{960}{60} = 16,00, \quad i' = 120 + 16,00 = 136,00.$$

Deuxième point.

$$i = 110, \quad E'' = 2820, \quad \lambda' I = 2820 - 2000 = 820,$$

$$\alpha'' I = \frac{1800 - 820}{60} = \frac{980}{60} = 16,33, \quad i'' = 110 + 16,33 = 126,33.$$

Troisième point.

$$i = 100, \quad E' = 2780, \quad \lambda''' I = 2780 - 2000 = 780,$$

$$\alpha''' I = \frac{1800 - 780}{60} = \frac{1020}{60} = 17,00, \quad i''' = 100 + 17,00 = 117,00.$$

Quatrième point.

$$i = 90, \quad E^{IV} = 2730, \quad \lambda^{IV} I = 2730 - 2000 = 730,$$

$$\alpha^{IV} I = \frac{1800 - 730}{60} = \frac{1070}{60} = 17,83, \quad i^{IV} = 90 + 17,83 = 107,83.$$

La courbe de la figure 84 donne les valeurs de i en fonction de λI, on voit que pour $i = 120$, on a :

$$\lambda I = 791,5.$$

On aura :

$$\alpha I = \frac{1800 - 791,5}{60} = \frac{1008,5}{60} = 16,81,$$

d'où :

$$E = 2000 + 791,5 = 2791,5,$$

l'intensité correspondante sur la caractéristique à vide est 103 environ, on a :

$$t = 103 + 16,81 = 119,80 \text{ soit } 120,$$

on peut donc adopter les valeurs trouvées et l'on aura :

$$\lambda = \frac{791.5}{450} = 1,759, \quad \alpha = \frac{16,81}{450} = 0,0374.$$

Cherchons avec ces données l'intensité d'excitation pour le point b, pour lequel on a :

$$\varepsilon = 2000, \qquad I = 340, \qquad \cos\varphi = 0,80.$$

La résistance d'une phase étant 0,0667 Ω, la chute de tension composée est :

$$0,577 \times 0,667 \times 340 = 13,3 \text{ v.}$$

$$\lambda I = 1,759 \times 340 = 598, \qquad \alpha I = 0,0374 \times 340 = 12,78.$$

La figure 84 donne le calcul graphique :

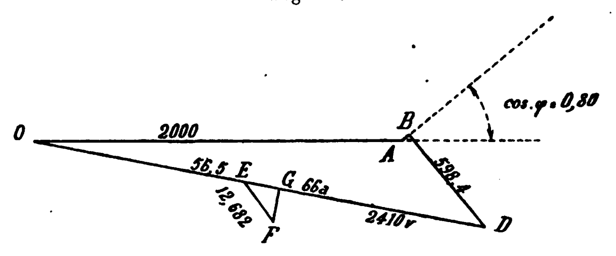
$$OA \# 2000 \text{ v.}, \qquad \cos BAC = 0,80, \qquad AB \# 23 \text{ v.}$$

$$BD \# 598 \text{ v.}$$

on trouve :

$$OD \# 2410 \text{ v.}$$

Fig. 86.



Pour cette valeur de la f. e. m., on trouve :

$$i = 56,5.$$

$$OE \# 58, \qquad EF \# 12,68,$$

d'où :

$$OF \# 65 \text{ a.}$$

L'essai direct avait donné également 65 a.

Pour le point c on a :

$$\varepsilon = 2000, \qquad I = 280, \qquad \cos\varphi = 1;$$

chute ohmique de tension :

$$0,577 \times 0,0667 \times 280 = 10,51 \text{ v.}$$

La figure 87 donne le calcul graphique

$$OB \# 2010,51.$$

$$BD = \lambda I = 1,759 \times 280 = 493 \text{ v.}, \qquad OD \# 2080 \text{ v.}$$

La courbe de la figure 85 donne, pour $E = 2080$ v.,

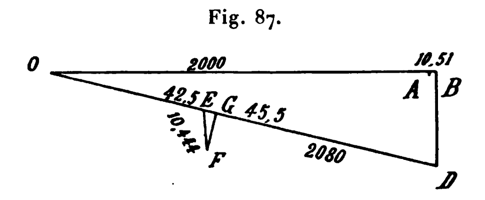
$$i = 42,5, \qquad \alpha I = 0,0374 \times 280 = 10,44, \qquad EF \# 10,44.$$

On a

$$OF \# 45,5 \text{a.},$$

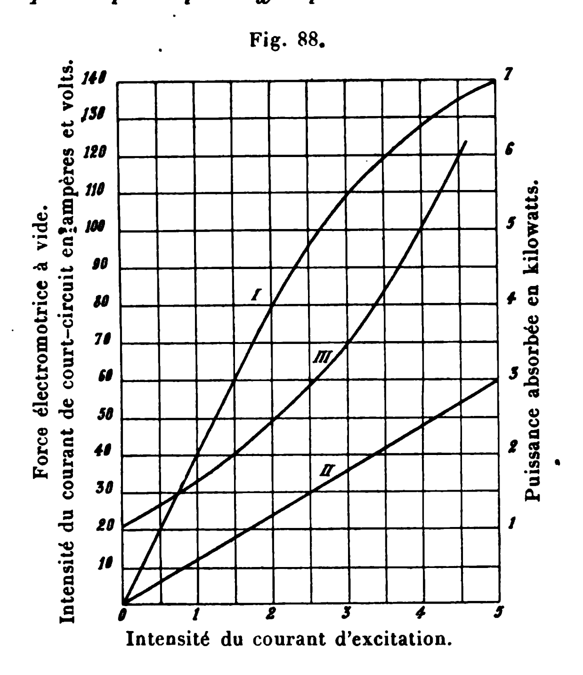
valeur donnée par l'essai : 46 a.

Fig. 87.



M. Blondel a indiqué le tracé d'une caractéristique qui permet de se rendre compte de l'influence de la réaction d'induit, *c'est la caractéristique de perte par effet parasite.*

Fig. 88.

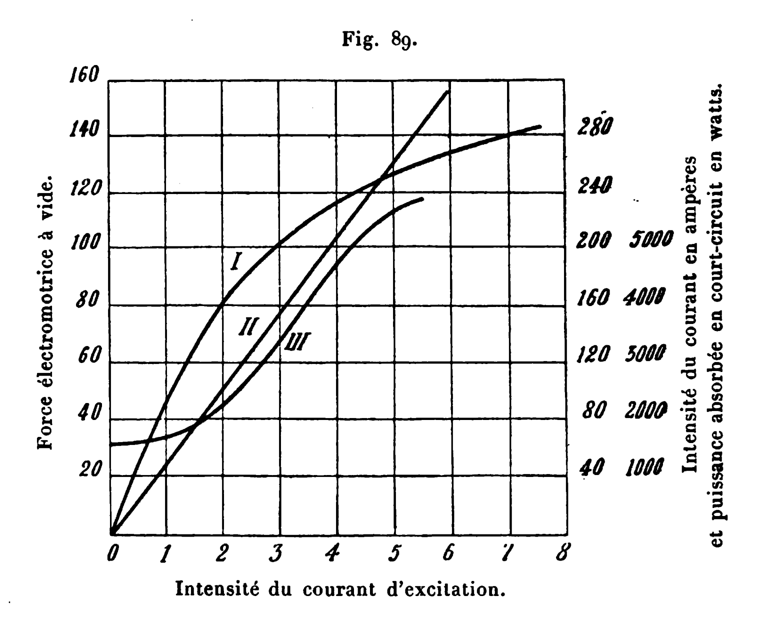


On actionne l'alternateur par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission ou au moyen d'un moteur taré, on met l'induit en court-circuit et l'on note la puissance absorbée en fonction de l'inten-

sité du courant d'excitation. On obtient ainsi une courbe qui a une allure rapidement ascendante dans le cas où la réaction d'induit est importante.

Les courbes des figures 88 et 89, empruntées à l'ouvrage de M. Blondel sur les moteurs synchrones ([1]), représentent : 1° la caractéristique à vide; 2° la caractéristique en court circuit; 3° la caractéristique de perte par effet parasite. Les courbes de la

Fig. 89.



Intensité du courant d'excitation.

figure 87 se rapportent à un alternateur à forte réaction d'induit, celles de la figure 88, à un alternateur à faible réaction d'induit.

ESSAIS DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS.

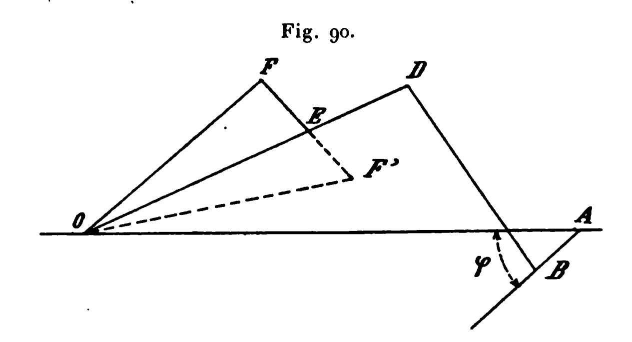
a. Moteurs synchrones et commutatrices. — La connaissance des constantes λ et α (*voir* p. 126) permet, dans le cas où un alternateur fonctionne comme moteur synchrone, de déterminer pour une d. d. p. aux bornes ε, un courant d'intensité I et un facteur de puissance $\cos\varphi$ donnés, l'intensité du courant d'excitation.

([1]) Encyclopédie scientifique des aide-mémoire.



On prend (*fig.* 90) OA $\#$ ε, BAO $= \varphi$, AB $\#$ r_aI, BD $\#$ λI, et l'on a comme f. e. m. E $\#$ OD. On cherche sur la caractéristique à vide (comme génératrice) l'intensité i_1 du courant d'excitation correspondant à E et l'on porte à une échelle convenable OE $\#$ i_1. Si I est décalé en arrière on mène EF parallèle à DB et l'on prend EF $\#$ αi_1, on a alors i proportionnel à la projection de OF sur OE, de sorte que $i < i_1$. Si I est décalé en avant de ε, on prend EF' $\#$ αi_1 et l'on a i proportionnel à la projection de OF' sur OE, de sorte que $i > i_1$.

Fig. 90.



L'intensité du courant dans un moteur synchrone dépend pour une charge donnée de l'intensité du courant d'excitation, il faut donc, lors du tracé d'une caractéristique en charge, bien indiquer si elle a été tracée avec excitation constante ou excitation variable.

On doit procéder à des essais de stabilité de marche, c'est-à-dire chercher, pour diverses charges, la limite à laquelle le moteur tombe hors du synchronisme ou se décroche. La tension restant constante, on augmente ordinairement la stabilité en augmentant l'intensité du courant d'excitation.

On doit également déterminer l'intensité du courant et le facteur de puissance au démarrage (*voir* p. 84, le dispositif à employer).

Pour des commutatrices, on doit vérifier, par exemple, si les dispositifs pris pour faire varier la tension aux bornes du courant alternatif permettent une variation suffisante de la tension du courant continu.

On peut tracer pour les moteurs synchrones les caractéristiques en les faisant fonctionner comme génératrices. Connaissant la caractéristique à vide et la caractéristique en court circuit comme génératrices et l'intensité du courant, le décalage φ (en avant ou en

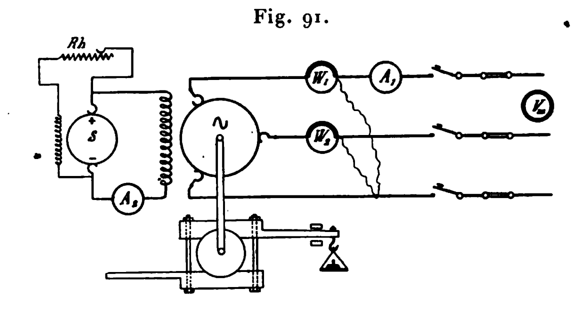
arrière), la d. d. p. aux bornes pour une excitation donnée, on peut déduire par des procédés analogues à ceux indiqués au sujet des alternateurs les valeurs des coefficients λ et α.

M. Mordey a indiqué une caractéristique qui permet de se rendre compte du fonctionnement d'un moteur synchrone; cette caractéristique donne pour une charge fixe l'intensité du courant d'induit en fonction de l'intensité du courant d'excitation; l'intensité passe par un minimum pour une valeur donnée du courant d'excitation, elle a la forme d'un V, et on la désigne parfois sous le nom *de courbe en* V.

La courbe en V peut se tracer soit pour le fonctionnement du moteur à vide, soit à une charge donnée; la charge fixe est obtenue soit au moyen d'un frein soit d'une génératrice tarée. On détermine l'intensité du courant au moyen d'un a. m., la tension que l'on maintient constante étant mesurée au moyen de v. m. et la puissance fournie au moyen d'un ou de deux w. m. suivant les cas.

La figure 91 donne le schéma de montage pour le tracé des

Fig. 91.



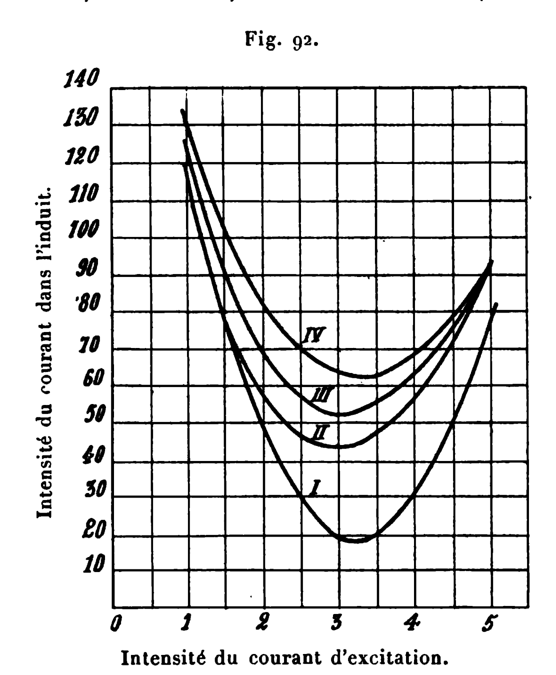
courbes en V d'un moteur synchrone triphasé à diverses charges. (On étudie en même temps naturellement la marche du moteur à diverses charges, la charge étant obtenue au moyen d'un frein de Prony).

Pour faire un relevé on charge le frein à la valeur voulue, on règle l'intensité du courant d'excitation (supposé fourni par une dynamo shunt), puis on serre le frein, et, au moment où l'équilibre est atteint, on procède aux relevés.

Le modèle de la feuille à tenir (soit pour cet essai, soit pour celui du rendement et du fonctionnement en charge) est donné sous le n° 7 à la fin du Volume.

Les courbes de la figure 92 sont des courbes en V, relevées par M. Kolben [1] sur un moteur synchrone des ateliers d'Œrlikon, la courbe I se rapporte à une charge de 1 kilowatt, la courbe II à une charge de 6,5 kilowatts, la courbe III à 14,3 kilowatts et la

Fig. 92.



courbe IV à 16,2 kilowatts. Les courbes correspondantes de la figure 93 donnent la puissance fournie au moteur dans chaque cas; on voit que, pour une même courbe en V, la puissance fournie varie relativement peu. On peut déduire de ces courbes le facteur de puissance correspondant soit à un décalage arrière (pour des intensités faibles) ou un décalage avant, en fonction de l'intensité du courant d'excitation.

Dans le cas de courants triphasés, si W est la puissance indiquée par les w. m., I l'intensité donnée par l'a. m. (dans une phase et ε la d. d. p.) entre phases, on a

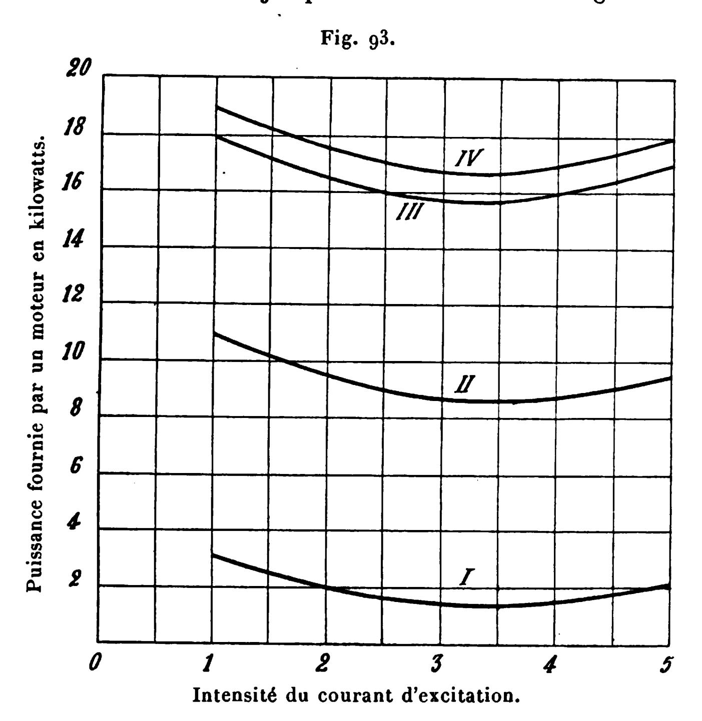
$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{3}\,\varepsilon\, I}.$$

---

(1) *Elektrotechnische Zeitschrift*, 19 déc. 1895.

Dans ces essais on a soin de faire varier l'intensité du courant d'excitation dans les deux sens jusqu'à amener le décrochage du moteur.

Fig. 93.



Pour les intensités d'excitation faibles, l'intensité dans le circuit extérieur est décalée en arrière de la tension; pour les intensités d'excitation élevées, au contraire, le courant est décalé en avant de la tension.

On peut, pour de forts décalages, en avant ou en arrière, déterminer par approximations successives les valeurs des constantes α et λ. On a i, I, ε et φ déterminés d'après la valeur de $\cos\varphi$. On procède absolument comme il a été indiqué page 128, en se servant de l'équation (1) déduite du fonctionnement comme alternateur en court-circuit et du diagramme de la figure 90 au lieu de celui de la figure 82, et l'on construit encore la courbe des points G (*voir fig.* 83).

On peut par exemple déterminer α et λ pour un point de la courbe en V à vide, avec i très grand voisin de la limite du décrochage, on a alors un décalage avant de I sur ε, que l'on mesure au moyen de

w. m. et vérifier en recommençant le calcul pour un point de la courbe à vide avec i très faible, voisin du décrochage; on a alors un décalage de I en arrière de ε que l'on mesure comme précédemment au w. m. On porte naturellement dans chaque cas EF dans le sens voulu (*voir fig.* 90).

Plus le décalage est élevé (c'est-à-dire plus $\cos\varphi$ est petit) plus les valeurs déterminées pour α et λ sont exactes.

b. Moteurs asynchrones. — Les courbes caractéristiques d'un moteur asynchrone fonctionnant sous une d. d. p. constante, sont en fonction de la charge utile : 1° celle de l'intensité du courant; 2° celle du facteur de puissance; 3° celle du glissement ou rapport entre la différence de la vitesse au synchronisme (dépendant de la fréquence et du nombre de pôles) et la vitesse réelle à la charge donnée à la vitesse au synchronisme. Le glissement s'exprime ordinairement en pour cent.

Si N_1 est le t/m. à la charge donnée, F la fréquence et p le nombre de paires de pôles, le glissement en pour cent est donné par la relation :

$$g = 100 \frac{\frac{60\,F}{p} - N_1}{\frac{60\,F}{p}} = 100 \frac{60\,F - p N_1}{60\,F}.$$

Le tracé de ces courbes se fait en même temps que la détermination du rendement à diverses charges, en chargeant le moteur au moyen d'un frein d'absorption ou d'un moteur taré. (Si l'on ne peut disposer de l'un ou de l'autre de ces moyens et si l'on doit absorber la puissance utile sans pouvoir la mesurer directement, on peut toujours la déterminer ensuite d'après la puissance fournie, en calculant les pertes par la méthode des pertes séparées) que nous indiquerons plus loin.

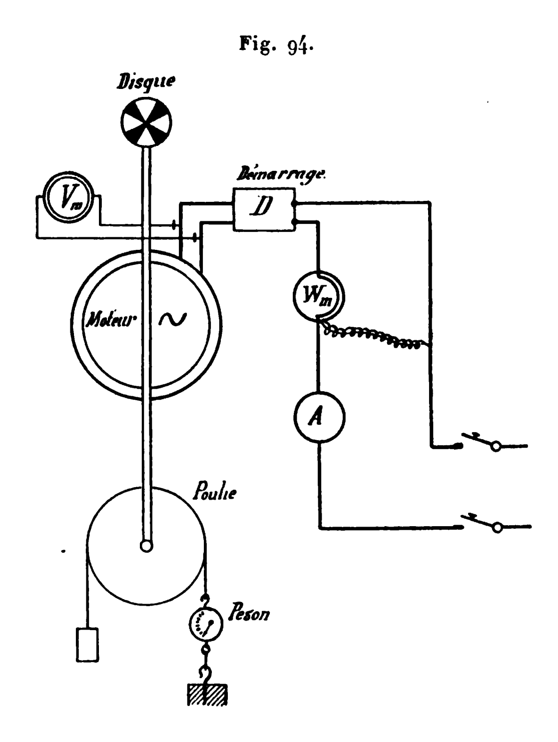
On commence par relever la puissance fournie, l'intensité du courant et le t/m., le moteur fonctionnant à vide, puis on le charge de plus en plus en procédant chaque fois aux divers relevés.

Le schéma de la figure 94 se rapporte à l'essai d'un moteur asynchrone monophasé, la charge étant obtenue au moyen d'un frein à corde, et le glissement mesuré par la méthode stroboscopique de M. Hospitalier, que nous indiquerons plus loin (*voir* p. 143).

Le modèle de la feuille à tenir est donné sous le n° 8 à la fin du volume.

Le facteur de puissance est égal au rapport de la puissance fournie (déduite de la lecture du w. m.) à la puissance apparente εI dans le cas du courant monophasé et $\sqrt{3}\,\varepsilon I$ dans le cas du courant alternatif. La plus grande difficulté est la détermination du glissement; quelle que soit l'habileté des opérateurs, on ne peut obtenir aucune valeur exacte en employant un compte-tours.

Fig. 94.



Quand les enroulements induits sont fixes ou quand ils aboutissent à des bagues, on peut placer dans le circuit un galvanomètre et compter les oscillations de son aiguille. M. Guilbert remplace le galvanomètre par une aiguille aimantée qu'il entoure d'une spire parcourue par le courant d'une des phases de l'induit; il suffit de compter le t/m. de l'aiguille pour avoir la différence entre le t/m. du moteur au synchronisme et le t/m. réel.

Pour que l'on puisse bien compter soit les oscillations du galva-

nomètre soit le t/m. de l'aiguille, le nombre ne doit pas dépasser 90 à 100 à la minute.

Si g est le glissement en pour cent, F la fréquence, p le nombre d'oscillations, le nombre d'oscillations n à la minute est donné par la relation

$$n = 0,60 \frac{gF}{p}.$$

Pour la fréquence ordinaire $F = 50$, P et $p = 1$ (moteur bipolaire) on a $n = 90$ pour un glissement de 3 pour 100; on ne peut donc guère employer cette méthode pour des moteurs bipolaires qui, en général, sont de faible puissance et ont des glissements atteignant 10 pour 100. Il faut remarquer toutefois que les moteurs à induit fixe ou à bagues sont ordinairement d'assez grande puissance, que le nombre de paires de pôles est assez élevé, de sorte que l'on peut alors en général employer la méthode.

Quand l'induit est en cage d'écureuil [1], on peut placer en regard de l'arbre du moteur asynchrone l'arbre d'un petit moteur synchrone ayant le même nombre de pôles et fixer sur chacun des arbres une petite lame flexible, ces lames étant disposées de manière à se toucher à un moment donné. On monte entre ces lames, au moyen de frotteurs, un circuit de pile dans lequel on dispose une sonnerie qui tinte chaque fois que les lames viennent au contact.

Comme le moteur synchrone tourne plus vite que l'autre, il y a à un moment donné contact de lames, puis le moteur synchrone prend de l'avance, rattrape l'autre et il y a nouveau contact.

Si t est la durée en secondes entre deux contacts successifs (on mesure par exemple le temps entre 10 ou 20 coups de sonnerie), p le nombre de paires de pôles, F la fréquence du courant, le glissement en pour cent g est donné par la relation

$$g = 100 \frac{p}{Ft}.$$

M. Benischke a indiqué un moyen de déterminer le glissement par la méthode stroboscopique, en utilisant un petit moteur synchrone auxiliaire, mais cette méthode est plus compliquée que la suivante indiquée par M. Hospitalier, basée sur l'observation suivante

(1) *Voir* également un appareil de M. E. Ziehl, décrit dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 12 décembre 1902.

de M. Samoyloff : le filament d'une lampe à incandescence (il en est de même pour l'arc), alimenté par un courant alternatif subit des variations d'éclat dont la fréquence est exactement le double de celle du courant.

Voici comment M. Hospitalier décrit la méthode ([1]) :

« On colle sur le bout de l'arbre du moteur asynchrone dont on veut déterminer le glissement un disque sur lequel sont tracés des secteurs alternativement blancs et noirs, en nombre total double de celui des pôles et l'on éclaire ce disque par une lampe à incandescence montée sur le courant alternatif alimentant le moteur.

» Par suite du glissement, les secteurs semblent tourner en sens inverse avec une vitesse angulaire qui représente la différence $d\omega_1$ $(\omega_1 - \omega_2)$ entre la vitesse angulaire ou pulsation ω_1 $\left(\omega_1 = \frac{2\pi F}{p}\right)$ et la vitesse réelle ω_2 du rotor. Le coefficient de glissement g_1 est alors donné par la relation :

$$g_1 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}.$$

Quand la vitesse du moteur est grande, c'est-à-dire quand, pour la fréquence ordinaire, il a une ou deux paires de pôles seulement, la vitesse de rotation fictive est trop grande pour être bien mesurée. Il suffit alors de commander par l'intermédiaire de l'arbre du moteur asynchrone un arbre faisant 2 ou 3 fois moins de tours, sur lequel on fixe le disque qui a alors 2 ou 3 fois plus de secteurs que s'il devait être monté directement sur l'arbre du moteur ; on est ainsi placé, dans le cas où le moteur aurait 2 ou 3 fois plus de paires de pôles.

Si n est le t/m. apparent des secteurs (dans le cas où le disque est monté directement sur l'arbre ou 2 ou 3 fois ce t/m. dans le cas où ce dernier est monté sur un arbre faisant 2 ou 3 fois moins de tours), F la fréquence, N le t/m. au synchronisme $\left(N = 60\,\frac{F}{p}\right)$, p le nombre de pôles, g le glissement en pour cent, N_1 le t/m. du moteur, on a :

$$N_1 = N - n = 60\,\frac{F}{p} - n = \frac{60\,F}{p}\left(1 - \frac{g}{100}\right),$$

$$g = \frac{100\,np}{60\,F} = 100\,\frac{n}{N}.$$

([1]) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens* de juillet 1901.

M. Heyland a indiqué [1] une méthode d'essai très simple pour *les moteurs asynchrones polyphasés,* mais cette méthode, pour les motifs que nous indiquerons plus loin, ne s'applique guère qu'aux moteurs de faible puissance.

On procède à deux relevés sous la d. d. p. normale.

1° On détermine l'intensité du courant et la puissance dépensée, le moteur tournant à vide;

2° On détermine les mêmes quantités, le rotor du moteur étant calé.

Dans les moteurs de faible puissance, on peut procéder sans danger à la deuxième mesure, mais, dans un moteur un peu puissant, l'intensité du courant peut devenir dangereuse. On pourrait bien tracer les courbes donnant l'intensité du courant et la puissance en fonction de la d. d. p. aux bornes, en faisant croître celle-ci jusqu'à ce que l'intensité du courant devienne dangereuse, mais pour obtenir les valeurs pour la d. d. p. normale, il faudrait prolonger ces courbes et de là une certaine indécision. Dans tous les cas, ces courbes ne sont pas des droites comme l'a cependant admis M. Heyland, dans sa communication, puisqu'il a indiqué la proportionnalité, elles ont l'allure des courbes de la figure 105, car l'on a alors affaire à un véritable transformateur.

Daus le cas d'un moteur triphasé, si $\mathcal{E}$ est la d. d. p. aux bornes (entre phases), I_V l'intensité du courant W_V, la puissance absorbée, le moteur tournant à vide, I_C et W_C les valeurs analogues pour l'essai avec le rotor calé, les intensités des courants wattés sont

$$I'_V = \frac{W_V}{\sqrt{3}\,\mathcal{E}}, \qquad I'_C = \frac{W_V}{\sqrt{3}\,\mathcal{E}}.$$

Ces quantités déterminées, on peut tracer le diagramme de la figure 94.

On mène une horizontale AB et une verticale AE_1. A l'échelle choisie on porte sur AB, $Ac \mathrel{\#} I'_V$ et l'on élève la verticale cc', on prend $Ad \mathrel{\#} I'_c$ et l'on élève la verticale dD; on prend alors $AC \mathrel{\#} I_V$ (C tombant sur cc') et $AD \mathrel{\#} I_C$. On trace ensuite un cercle passant par les points C et D et ayant son centre O sur la verticale AE, qui

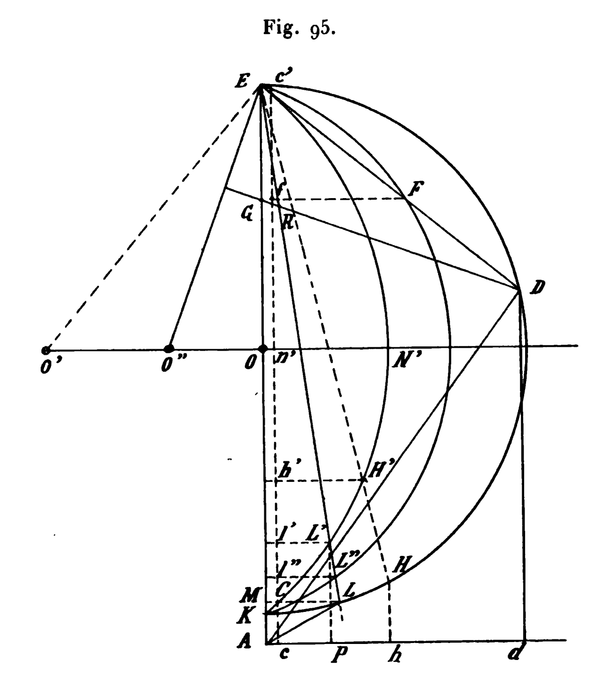
(1) *Éclairage électrique* du 14 juillet 1903.

coupe cette verticale en E et en K. On joint E à D et l'on mène en E une perpendiculaire à ED qui rencontre l'horizontale passant par O en O′.

De O′ comme centre, on trace un cercle passant par E et par K. On porte ensuite sur la droite DE à partir de D une longueur DF donnée par la relation

$$\mathrm{DF} = 0,866\, \frac{r\,\mathrm{I}_c}{\mathcal{E}}\,\mathrm{AD},$$

Fig. 95.



r étant la résistance en ohms mesurée à chaud, entre deux bornes de l'inducteur (*voir* p. 110). On trace ensuite un troisième cercle passant par E et par F et ayant son centre O″ sur l'horizontale OO′ et l'on mène par D la perpendiculaire DG sur EO″, qui coupe la verticale AE en G.

Le diagramme ainsi tracé permet de déterminer toutes les conditions de fonctionnement du moteur. Si l'on mène une droite passant par le point E, coupant respectivement en L, L′ et L″ les trois cercles, et si l'on mesure à l'échelle admise pour les intensités, LM (distance

horizontale entre L et AE), $L'l'$ (distance horizontale entre L' et cc') et $L''l''$ (distance horizontale entre L'' et cc'), on aura :

Puissance fournie au moteur $\# 1,73\,\mathcal{E}\,LM$;
Intensité du courant (par phase) $\# AL$;
Angle de décalage $\varphi = LAP$, $\cos\varphi = \cos(LAP)$;
Puissance utile $\# 1,73\,\mathcal{E}\,L'l'$.
Le rendement est donc $\frac{LL'}{LM}$.

La puissance au synchronisme correspondant au couple du moteur est, en watts :

$$Ws \# 1,73\,\mathcal{E}\,L'l'.$$

Si p est le nombre de paires de pôles par phase, le couple en kilogrammètres est donné par la relation :

$$C = 0,0167\,p\,\frac{Ws}{F},$$

F étant la fréquence; C étant représenté par $L'l'$, on pourra en déduire l'échelle des couples.

La droite EL coupe DG en R et le glissement en pour cent est donné par la relation :

$$g = \frac{100\,GR}{GD}.$$

Si l'on veut déterminer les conditions de fonctionnement correspondant à une puissance utile W_1 donnée du moteur, on procède de la manière suivante :

On prend $cP \# \frac{W_1}{1,73\,\mathcal{E}}$, on mène la verticale passant par P, jusqu'à sa rencontre en L' avec le cercle de centre O'; on joint E à L' et l'on détermine les conditions de fonctionnement comme il a été indiqué.

La puissance maximum du moteur est $\# 1,73\,\mathcal{E}\,n'N'$.

Le couple au démarrage est $\# Ff$ (à l'échelle des couples).

En menant par A la tangente AH au cercle de centre O, on détermine le point H qui correspond au facteur de puissance maximum, l'angle de décalage HAP étant minimum.

Dans le cas d'un moteur diphasé, si W_V et W_C sont les puissances totales (au besoin le double de la puissance indiquée quand on emploie un seul w. m.) indiquées par les w. m. respectivement, le

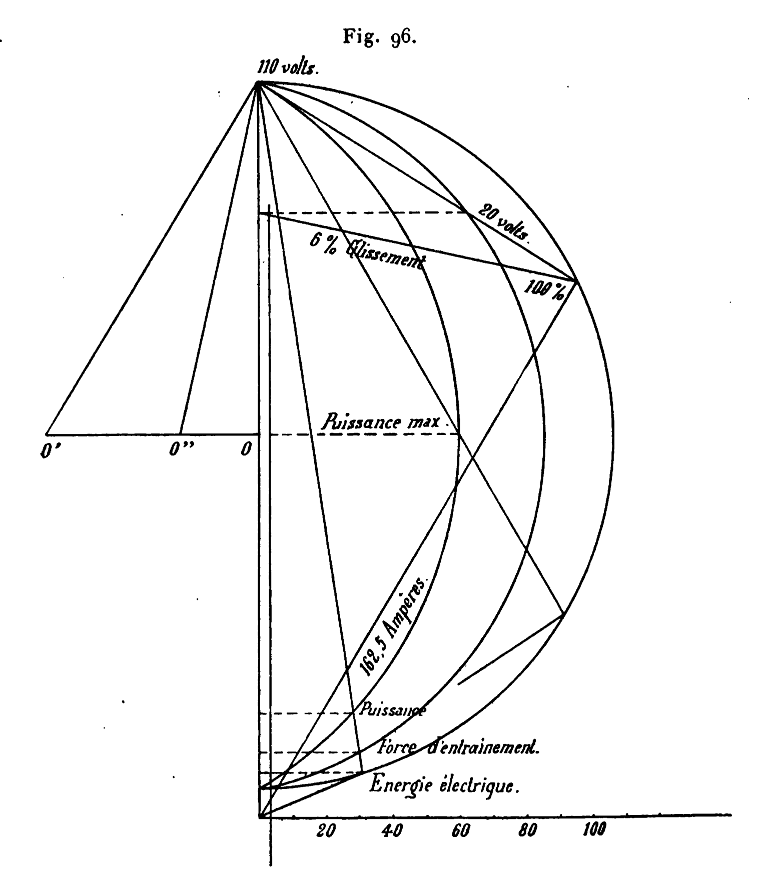
moteur fonctionnant à vide et le rotor étant calé, on a :

$$I'_V = \frac{W_V}{2\mathcal{E}}, \qquad I'_C = \frac{W_V}{2\mathcal{E}}.$$

$\mathcal{E}$ étant la tension dans une des phases; le diagramme se construira comme il a été indiqué. Si r est la résistance d'une phase, on aura :

$$DF = AD\frac{rI_c}{\mathcal{E}}.$$

Fig. 96.



La puissance fournie au moteur sera $\# 2\mathcal{E}LM$.
La puissance utile sera $\# 2\mathcal{E}L'l'$.
La puissance correspondant au couple moteur sera :

$$W_s \# 2\mathcal{E}L'l',$$

et si p est le nombre de paires de pôles par phase et F la fréquence, le couple c en kilogrammètres sera donné en fonction de W_1 exprimé en watts, par la relation donnée page 146.

La figure 96 reproduit un diagramme construit par M. Heyland, se rapportant à un moteur de 10 chevaux.

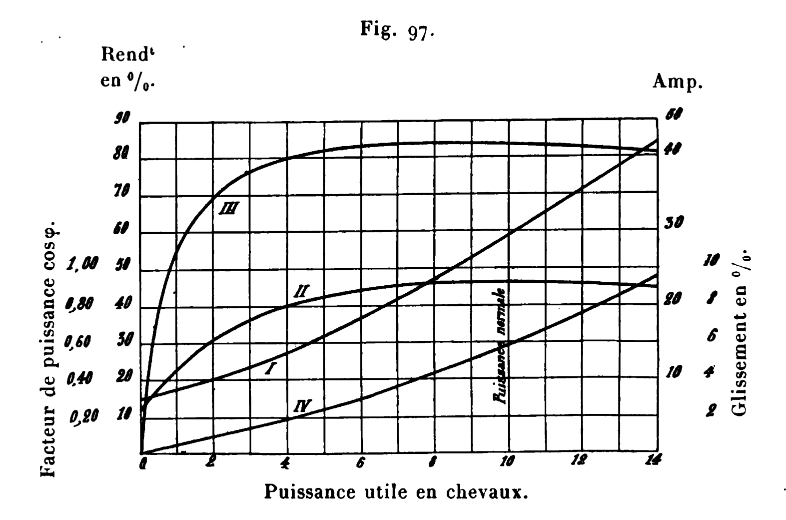
Les essais ont donné pour $\mathcal{E} = 110$ v.

$$I_V = 8 \text{ a.}, \qquad W_V = 197 \text{ w.},$$
$$I_c = 162{,}5 \text{ a.}, \qquad W_c = 9000 \text{ w.}$$

La résistance par phase était de 0,123 Ω.

Les courbes de la figure 97 se rapportent à ce diagramme; elles

Fig. 97.



donnent l'intensité du courant (courbe I); la valeur du facteur de puissance, cos φ (courbe II); le rendement en pour cent (courbe III); et le glissement en pour cent (courbe IV), en fonction de la puissance utile en chevaux.

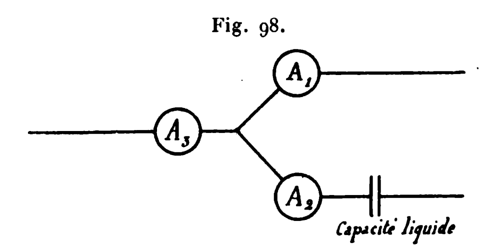
Les essais de démarrage se font de la même manière que pour les moteurs à courant continu. Si pour le démarrage on emploie des résistances iutercalées dans l'induit, on pourra, en procédant à des essais successifs, tracer la courbe de la résistance à intercaler dans l'induit en fonction du couple au démarrage et en même temps la courbe de l'intensité du courant et celle du facteur de puissance également en fonction du couple. Si, pour le démarrage, on place

des résistances inductives dans le circuit inducteur, on déterminera au besoin la résistance à intercaler, ainsi que l'intensité du courant pour un couple donné, ou bien on déterminera le couple pour la résistance donnée.

Pour un moteur polyphasé, dans le cas où il est muni d'un dispositif de démarrage intercalé dans l'induit, on peut faire deux séries d'essais et construire deux diagrammes de M. Heyland. L'un de ces diagrammes se rapporte au cas où le dispositif de démarrage n'est pas intercalé (s'il est possible d'obtenir les relevés, le rotor calé, *voir* p. 144) et l'autre au cas où le dispositif est intercalé; il est toujours possible de procéder à ces derniers relevés.

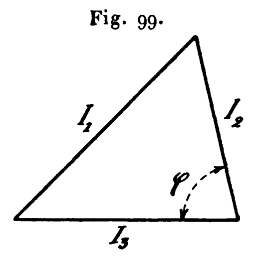
L'examen de deux diagrammes permettra de se rendre compte de l'influence du dispositif de démarrage; on pourra, par exemple, comparer les valeurs des couples au démarrage, des intensités et des facteurs de puissance dans les deux cas.

Fig. 98.



Quand on emploie pour le démarrage d'un moteur asynchrone monophasé une capacité liquide ou une bobine à réaction, on peut déterminer le décalage produit par le dispositif en plaçant 3 a. m.

Fig. 99.



comme l'indique la figure 98. On relève les indications des 3 a. m. quand le moteur, après avoir démarré, est maintenu fixe. On trace alors (*fig.* 99) un triangle dont les côtés sont proportionnels aux

intensités I_1, I_2, I_3, et l'angle compris entre les côtés I_1 et I_2 donne le décalage entre les courants circulant dans les deux enroulements du moteur.

ESSAIS DE FONCTIONNEMENT DES TRANSFORMATEURS.

Le rapport de transformation est le rapport de la f. e. m. au secondaire, à la f. e. m. au primaire, l'appareil fonctionnant à vide.

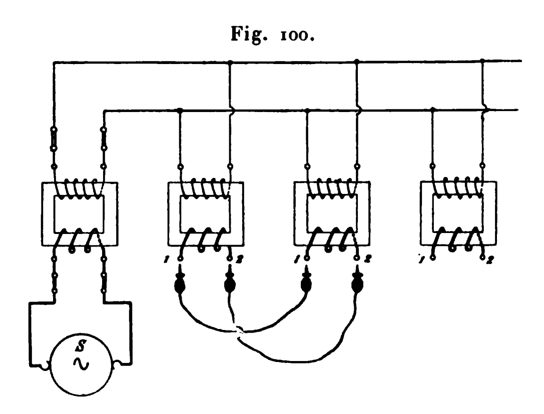
On place un électromètre dans chacun des circuits, et, le secondaire ouvert, on détermine les f. e. m. en faisant varier la f. e. m. appliquée au primaire. Pour plus de facilité, on prend comme primaire le circuit à basse tension, on a

$$E_2 = KE_1.$$

Dans ce cas, K est plus grand que l'unité. On prend pour K la moyenne des valeurs obtenues dans *divers essais*.

Quand on a un grand nombre de transformateurs devant fonctionner dans une même installation, il est nécessaire de vérifier si tous ont le même rapport de transformation. On peut alors procéder de la manière suivante, comme l'a indiqué M. Feldmann ([1]).

Fig. 100.



On alimente le circuit à basse tension d'un transformateur au moyen d'une source d'électricité, le secondaire dessert deux conducteurs sur lesquels sont branchés (*fig.* 100) les secondaires des trans-

([1]) Feldmann, *Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstrom-Transformatoren.*

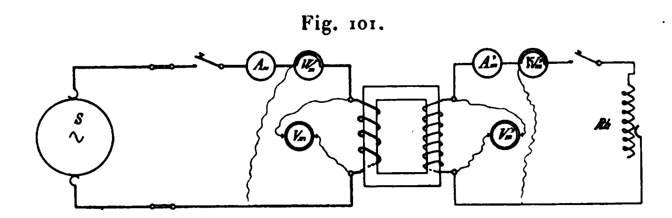
formateurs que l'on veut essayer. On prend deux conducteurs isolés terminés chacun par des pointes munies d'une poignée et l'on relie au moyen d'un des conducteurs les bornes de même signe de deux des appareils, puis avec l'autre les deux autres bornes de ces deux appareils; s'il y a la moindre différence dans les rapports de transformation, on a une étincelle quand on rompt les contacts.

Quand le transformateur est en charge, le rapport de transformation (supposé > 1) diminue avec la charge; la diminution provient de la chute de potentiel ohmique et est due en même temps à la dispersion magnétique de l'appareil; elle augmente avec le décalage dans le circuit secondaire.

L'essai peut se faire en chargeant le secondaire à haute tension du transformateur au moyen d'un rhéostat inductif au besoin, en maintenant la d. d. p. constante aux bornes du primaire et en mesurant la d. d. p. aux bornes du secondaire; mais, quand la d. d. p. dans le secondaire est très élevée, l'essai devient très délicat.

La figure 101 donne le montage à effectuer; dans ce cas, les w. m. permettent de mesurer les puissances fournies et recueillies et de déterminer en même temps les rendements à diverses charges; au moyen des indications des a. m. et v. m., on calcule les facteurs de puissance dans le primaire et le secondaire.

Fig. 101.

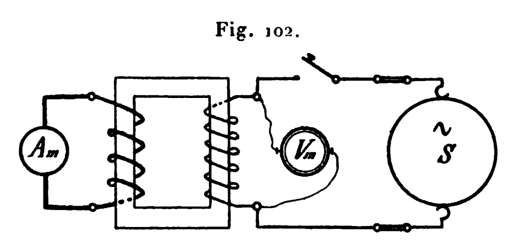


M. Kapp a indiqué une méthode permettant de déterminer au moyen d'un diagramme la tension E_2 dans le secondaire en fonction de la tension E_1, de I_2 et de $\cos\varphi_2$.

Pour construire le diagramme, on trace d'abord la *caractéristique en court-circuit* du transformateur. Pour cela on relie directement les bornes d'un des circuits, ordinairement celui à basse tension, à un a. m. de faible résistance et sans self-induction (un appareil à fil chaud par exemple) (*fig.* 102). On dispose une source d'électricité S à tension variable dans le circuit à haute tension,

un alternateur, par exemple (si la source est à tension constante, un rhéostat permet de faire varier la tension). On fait varier la d. d. p. aux bornes du transformateur et l'on note chaque fois l'intensité du courant. La courbe de l'intensité en fonction de la d. d. p. est une droite que l'on trace.

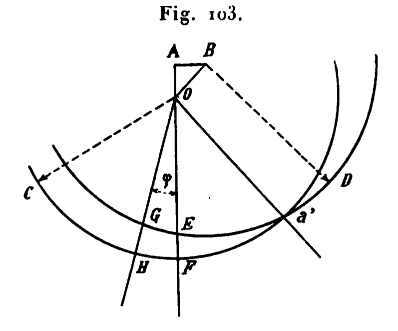
Fig. 102.



Si r_h et r_b sont les résistances ohmiques (mesurées à chaud) des enroulements à haute et à basse tension, et K le rapport de transformation $\left(K = \frac{N_b}{N_h}, N_b\right.$ étant le nombre des spires de l'enroulement à basse tension et N_h le nombre de spires de l'enroulement à haute tension, K peut du reste être déterminé au moyen de l'essai indiqué; on a $\left.K < 1\right)$, on prend à une échelle convenable (*fig.* 103) :

$$AO \# r_b I + K r_h I_h.$$

Fig. 103.



On a très approximativement $I_h = KI$ (I_h étant l'intensité dans le circuit à haute tension), d'où :

$$AO \# I(r_b + K^2 r_h).$$

En général, on peut négliger $K^2 r_h$ sans grande erreur.

Par A, on mène une perpendiculaire AB à AO et l'on prend

$$OB \# K\mathcal{E}_h.$$

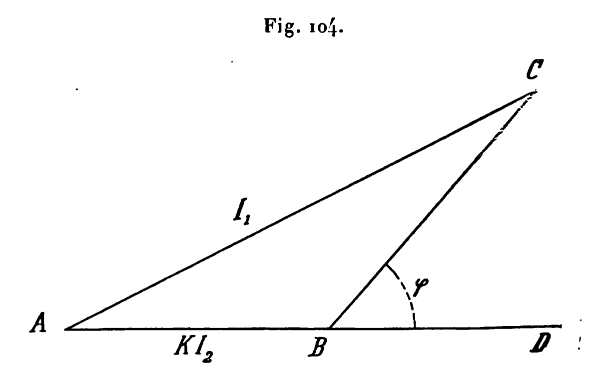
$\mathcal{E}_h$ étant la d. d. p. aux bornes de l'enroulement à haute tension correspondant à l'intensité I en court-circuit dans l'enroulement à basse tension.

On trace ensuite avec des rayons proportionnels à la valeur normale E_b de la d. d. p. aux bornes du circuit à basse tension (donnée par la relation KE_h, E_h étant la valeur normale de la d.d.p. du circuit à haute tension) deux cercles ayant respectivement comme centres O et B.

Si, par exemple, φ est l'angle de décalage du courant à basse tension d'intensité I, en arrière de la tension, on mène à gauche de la verticale la droite OH faisant avec AO l'angle φ (si le décalage est en avant, on doit porter φ à droite), OG représente la tension et GH la chute de tension.

Le diagramme représente également à une autre échelle ($OF \# E_h$) les tensions dans le circuit à haute tension considéré comme secondaire; l'intensité y étant alors $\frac{I}{K}$, et le décalage celui indiqué.

Fig. 104.



Quand on connaît l'intensité L_{1V} du courant circulant dans le circuit primaire du transformateur fonctionnant avec le circuit secondaire ouvert, c'est-à-dire à vide, sous la tension normale aux bornes E_1 ainsi que la puissance W_V absorbée, on peut, au moyen du diagramme de Kapp, déterminer toutes les conditions de fonc-

tionnement du transformateur pour une intensité I_2 et $\cos\varphi_2$ donnés dans le secondaire.

E_2 se détermine d'après le diagramme de Kapp.

Pour déterminer I_1 on trace le diagramme de la figure 104. On prend, si $K = \frac{N_1}{N_2}$ (N_1 nombre de spires du primaire, N_2 nombre de spires du secondaire), $AB \# KI_2$; on fait $DBC = \varphi$; on prend $BC \# I_{1v}$ et AC représente I_1 à l'échelle donnée. (On a du reste assez approximativement $I_1 = KI^2$, dès que I_2 est un peu fort vis-à-vis de $\frac{I_{1v}}{K}$, c'est-à-dire à de fortes charges de l'appareil).

La puissance à fournir au primaire W_1 est :

$$W_1 = W_V + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 - r_2 - r_1 I_{1V}^2,$$

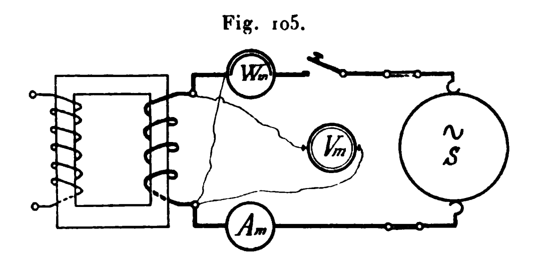
r_1 et r_2 étant respectivement les résistances ohmiques (à chaud) des enroulements primaire et secondaire. Le facteur de puissance dans le primaire est :

$$\cos\varphi_1 = \frac{W_1}{E_1 I_1}.$$

On peut tracer une caractéristique intéressante du transformateur en appliquant aux bornes de l'un des circuits une tension croissante et en mesurant chaque fois les pertes à vide, c'est-à-dire en laissant l'autre circuit ouvert.

On mesure à l'aide d'un w. m. la puissance absorbée et un a. m.

Fig. 105.

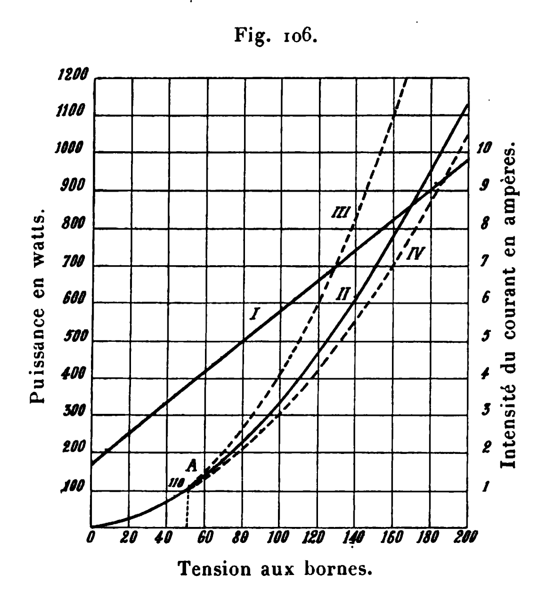


donne l'intensité du courant (*fig.* 105). On rapporte ensuite, en fonction de la tension variable aux bornes (*fig.* 106), la puissance absorbée (courbe II) et l'intensité du courant (courbe I). La puissance absorbée se compose de la perte dans le cuivre qui est rI^2 et des pertes par hystérésis et courants de Foucault. On peut au

besoin déterminer pour chaque point la perte dans le cuivre rI^2 et obtenir la courbe des pertes par hystérésis et courants de Foucault, mais la valeur de rI^2 dans les transformateurs modernes est si faible qu'il est inutile d'en tenir compte.

Les courbes de la figure 106 se rapportent à un transformateur

Fig. 106.



Tension aux bornes.

de 120 kilowatts, 160/5500 v. de la Société *L'Éclairage électrique,* avec 200 v. au secondaire, la puissance absorbée à vide est de 1130 w., l'intensité 9,80 a., la résistance du circuit est de 0,00113 Ω, la perte dans le cuivre $rI^2 = 0{,}00113 \times \overline{9{,}80}^2 = 1{,}08$ w., c'est-à-dire absolument négligeable.

On peut se rendre compte approximativement de l'importance relative des pertes par courants de Foucault et de celles par hystérésis de la manière suivante :

On admet d'abord pour une tension donnée que les pertes sont entièrement dues aux courants de Foucault, de sorte que, pour une tension n fois plus forte, les pertes sont n^2 fois plus élevées ; on prend des valeurs croissantes pour n et l'on trace la courbe des pertes de puissance calculées. Sur la courbe de la figure 106, pour $E = 50$ v., on a, comme puissance perdue, 110 w.; pour nE, on aura $110n^2$ w.; on trace ainsi la courbe III.

On admet ensuite que pour la tension donnée (50 v.) les pertes sont entièrement dues à l'hystérésis, de sorte que pour la tension nE, les pertes seront $n^{1,6}$ fois plus fortes; on trace ainsi la courbe IV. On voit que dans le transformateur les pertes par courants de Foucault sont bien moins élevées que celles par hystérésis, puisque la courbe réelle (II) se rapproche bien plus de celle des pertes par hystérésis (IV) que de celle des pertes par courants de Foucault (III).

§ 3. — **Essais de rendement.**

ESSAIS DE RENDEMENT DES ALTERNATEURS ET DES MOTEURS SYNCHRONES.

On peut naturellement employer les méthodes directes ou de substitution, mais dans le cas de machines de grande puissance les méthodes directes ne sont plus applicables, et même les méthodes de substitution sont bien difficiles à employer.

Pour le cas d'un alternateur commandé par une machine à vapeur, on peut arriver à déterminer le rendement en relevant des diagrammes de la machine à vapeur, l'alternateur fonctionnant d'abord à vide, puis ensuite en charge. La différence des puissances indiquées, calculées d'après les diagrammes (*voir* p. 169), donne la puissance fournie à l'alternateur.

Dans ce cas, les pertes de l'alternateur fonctionnant à vide sont comptées dans les pertes organiques de la machine à vapeur.

Pour obtenir des résultats un peu exacts, il faut que toutes les précautions nécessaires soient prises lors du relevé des diagrammes (*voir* Chapitre V), aussi cette méthode est-elle rarement employée et beaucoup de constructeurs se refusent à l'admettre, mais elle peut servir de vérification sommaire quand on fait l'essai de réception définitive du groupe électrogène.

L'emploi de la méthode des pertes séparées est beaucoup plus délicat dans le cas des alternateurs que dans le cas des dynamos à courant continu. Ceci provient de la difficulté d'avoir la même excitation à vide qu'en charge; cependant la connaissance des coefficients λ et α (*voir* p. 126) peut servir dans ce cas.

Si l'on veut trouver le rendement pour une charge $\mathcal{E}I\cos\varphi$ d'un alternateur ou d'un moteur, on déterminera l'intensité d'excitation i'_1

correspondant à la charge donnée, comme il a été indiqué pages 126 et 136.

On pourra ensuite faire fonctionner la machine comme moteur à vide et tracer la courbe en V ([1]) (ou une partie de cette courbe), en faisant varier l'excitation, et en mesurant chaque fois la puissance absorbée. On déterminera pour chaque valeur de i le facteur de puissance, c'est-à-dire $\cos\varphi$ (φ étant positif ou négatif suivant le cas). Pour diverses intensités d'excitation on déterminera, en construisant le diagramme indiqué, la valeur du courant d'excitation correspondant à la f. e. m. induite et l'on tracera une courbe en prenant pour abscisses ces valeurs, les puissances absorbées correspondant à la même valeur de i étant prises comme ordonnées. Au moyen de cette courbe, on déterminera la puissance correspondant à l'intensité d'excitation i_1, correspondant à la f. e. m. induite, dans le cas du fonctionnement comme alternateur à la charge donnée.

Au lieu d'employer cette méthode un peu compliquée, on pourra déterminer, en actionnant la machine par un moteur taré, la puissance qu'elle absorbe à vide étant excitée avec le courant d'intensité i'_1. Il sera bon de faire varier l'intensité d'excitation et de tracer la courbe de la puissance absorbée de manière à déterminer la puissance correspondant à i_1 sur cette courbe.

Dans le cas où l'alternateur est commandé directement par un moteur à vapeur, on peut déterminer la puissance absorbée à vide, avec une excitation donnée, en relevant les diagrammes, la machine non excitée, puis la machine excitée à la valeur voulue. La différence des puissances indiquées donne les pertes électriques à vide de l'alternateur.

Si l'on n'a pas de moteur taré à sa disposition, on pourra se servir, pour déterminer la puissance absorbée à vide à N t/m. avec l'excitation i'_1, de la méthode du lancer, et même faire plusieurs essais successifs en faisant varier l'intensité du courant d'excitation pour tracer la courbe.

Dans l'application de la méthode du lancer, on ne peut, comme dans le cas d'une dynamo à courant continu, déterminer directement

([1]) Dans le cas de machines à courants monophasés, lors du tracé de cette courbe, les irrégularités peuvent être très grandes, et il est alors presque impossible de faire des lectures un peu précises, la machine fonctionnant à vide, les aiguilles des instruments oscillant constamment.



le facteur par lequel on doit multiplier la sous-normale pour avoir la puissance; on est obligé d'employer la méthode du couple supplémentaire due à M. Routin, indiquée page 9.

La courbe donnant la puissance absorbée à vide en fonction du courant d'excitation, coupe naturellement l'axe des ordonnées en un point dont l'ordonnée correspond à la puissance perdue par suite des frottements, etc., c'est-à-dire aux pertes mécaniques (point que l'on peut déterminer directement dans les essais en actionnant ou en lançant la machine non excitée). On peut donc en tenir compte dans le cas où, pour un alternateur monté ensuite comme volant de la machine à vapeur, ces pertes devraient être comprises dans les pertes organiques du moteur.

Au point de vue de la puissance dépensée pour l'excitation, il est bon d'indiquer dans les cahiers des charges, dans le cas où l'excitation est empruntée à une source absolument indépendante, si l'on doit compter simplement la puissance $\mathcal{E}_e i_e$ aux bornes de l'alternateur, ou bien faire rentrer en ligne de compte le rendement de l'excitatrice.

Quand l'excitatrice est commandée par l'arbre de la génératrice, soit que son induit soit monté directement sur cet arbre, soit qu'elle soit commandée par courroie, il faut naturellement compter dans les pertes la puissance absorbée par l'excitatrice. Dans le cas où l'on procède à l'essai à vide au moyen d'un moteur taré actionnant la machine, on peut monter l'excitatrice et lui faire débiter le courant d'excitation; la puissance déterminée comprend alors la puissance nécessaire pour l'excitation. Il en est de même, quand on détermine la puissance au moyen des diagrammes de la machine à vapeur.

Quand, par contre, on emploie pour déterminer les pertes à vide la méthode du lancer, on ne peut plus employer l'excitatrice montée sur l'arbre ou la commander par ce dernier, car l'intensité du courant d'excitation diminue quand la vitesse diminue. Dans ce cas, il faut déterminer les pertes dans l'excitatrice et les ajouter [1].

Si W_V est la perte à vide, W_e la puissance nécessaire à l'excitation et W_i la perte due à la résistance ohmique de l'induit, le rendement

---

[1] Dans celles-ci peut rentrer au besoin la puissance perdue, par suite de la résistance de contact entre les balais et les bagues pour le cas où l'inducteur est mobile.



comme génératrice est :

$$\mathcal{R} = \frac{W}{W + W_V + W_i + W_e}.$$

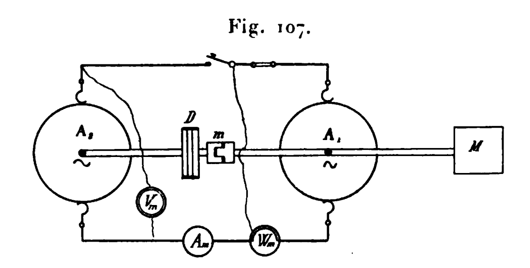
Dans le cas de moteur, le rendement est (si W est la puissance électrique fournie)

$$\mathcal{R} = \frac{W - W_V - W_i - W_e}{W}.$$

Dans les machines où l'induit est mobile, on peut avoir à tenir compte de la puissance eI absorbée par suite de la résistance de contact des balais et des bagues, e étant la chute de tension due à cette résistance de contact (*voir* p. 108).

M. Blondel a indiqué une méthode d'opposition pour l'étude des alternateurs. Dans cette méthode les deux alternateurs sont reliés par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission D (*fig.* 107)

Fig. 107.



et d'un manchon m, permettant de faire varier au besoin le calage entre les deux arbres. L'ensemble est actionné par un moteur taré M, l'alternateur A_1 sert de moteur et l'alternateur A_2 de génératrice ; on peut déterminer à chaque instant, d'après la puissance produite par le moteur M et les indications du dynamomètre de transmission D, la puissance fournie à l'ensemble et celle fournie à la génératrice.

On peut modifier le clavetage des deux arbres pour faire varier l'angle de calage des deux machines (qui est égal en marche à l'angle au repos, augmenté de l'angle de torsion du dynamomètre) ou le décalage des f. e. m. On peut ainsi, en faisant varier les intensités des courants d'excitation et les décalages, faire fonctionner les deux alternateurs, dans toutes les conditions de puissance et de décalage entre la tension et l'intensité du courant que l'on veut et par con-

séquent tracer les caractéristiques et déterminer les rendements. La puissance dans le circuit extérieur étant déterminée au moyen d'un w. m. et un v. m. et un a. m. indiquant la d. d. p. et l'intensité du courant.

ESSAIS DE RENDEMENT DES MOTEURS ASYNCHRONES.

Lors des essais de rendement par la méthode directe ou la méthode de substitution, on détermine en même temps le glissement, le facteur de puissance ($\cos\varphi$), l'intensité du courant, la puissance fournie aux bornes, en fonction de la puissance utile. On peut charger les moteurs de faible puissance jusqu'à les décrocher sans avoir à craindre de les endommager (on s'aperçoit du reste que l'on surcharge le moteur à l'accroissement considérable du glissement et de l'intensité du courant). Le diagramme de M. Heyland (p. 145) permet également de déterminer les rendements aux diverses charges, puisque l'on peut mesurer la puissance utile et la puissance fournie correspondante.

On peut également déterminer le rendement par la *méthode des pertes séparées.*

Les pertes dans un moteur asynchrone sont dues :

1° A l'hystérésis, aux courants de Foucault, aux frottements, etc.;
2° A la résistance ohmique de l'inducteur;
3° A la résistance ohmique de l'induit.

Les pertes de la première catégorie se mesurent en faisant fonctionner le moteur à vide à la d. d. p. normale et en mesurant la puissance absorbée à l'aide de w. m. Celles de la deuxième catégorie sont déterminées quand on connaît l'intensité du courant d'induit et la résistance ohmique de l'inducteur.

Quand les circuits induits sont accessibles on peut également y mesurer l'intensité du courant et la résistance ohmique. Quand on a affaire à un moteur enroulé en cage d'écureuil, la perte d'énergie dans l'induit peut être déterminée de la manière suivante :

Si W est la puissance mesurée à la poulie, on a, si W_a est la perte dans l'induit, N le t/m. au synchronisme et N' le t/m. à la charge donnée,

$$W_a = W\frac{N - N'}{N'}.$$

On peut prendre pour W la puissance fournie W_1 diminuée des pertes W_V à vide W_i dans l'induit, et W_a cherchée :

$$W_a = (W_1 - W_V - W_i - W_a)\frac{N - N'}{N'},$$

$$W_a = (W_1 - W_V - W_i)\frac{N - N'}{2N - N'}.$$

et déterminer ainsi W_a.

ESSAIS DE RENDEMENT DES TRANSFORMATEURS.

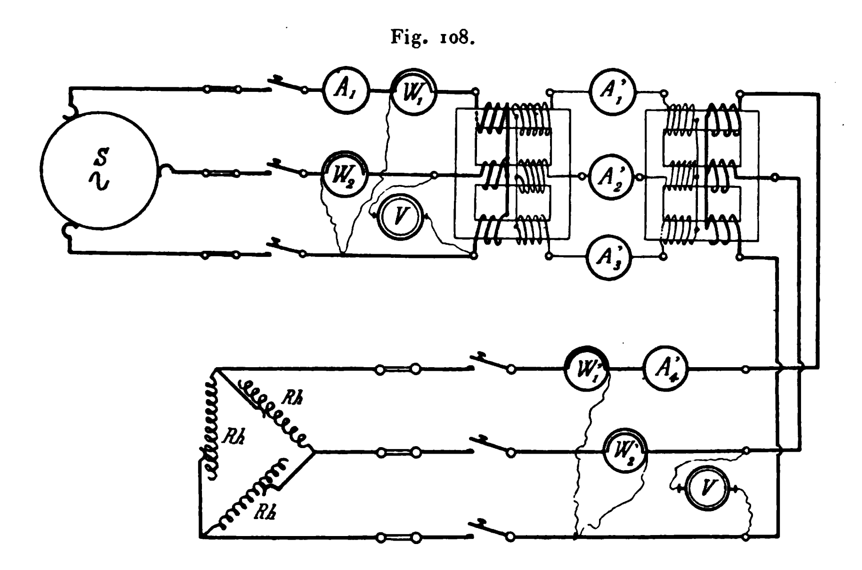
Le rendement peut se mesurer en chargeant le circuit à basse tension et en mesurant au moyen de w. m. la puissance fournie au primaire et la puissance dépensée dans le secondaire. Les rendements de ces appareils sont généralement très élevés, les pertes sont faibles et la moindre erreur dans les mesures entraîne une erreur relative considérable dans l'estimation des pertes.

Une méthode permettant de déterminer les pertes avec plus de précision déjà, et qui en outre évite de mesurer la puissance dans le circuit à haute tension, consiste à prendre deux transformateurs identiques, à relier leurs circuits à haute tension et à desservir l'un des circuits à basse tension par une source d'électricité de puissance suffisante et à charger l'autre circuit à basse tension au moyen de résistances inductives au besoin. On s'arrange pour que, à la charge normale, la tension aux bornes du premier transformateur (celui dont le circuit à basse tension est desservi par la source d'électricité) ait une d. d. p. un peu supérieure à la normale, tandis qu'aux bornes de l'autre la d. d. p. y est un peu inférieure. On mesure la puissance dans les circuits à basse tension au moyen de w. m. et le rendement est $\sqrt{\frac{W_u}{W_f}}$, W_u étant la puissance absorbée dans les résistances et W_f la puissance fournie au premier appareil. La figure 108 donne le schéma de montage pour l'essai de deux transformateurs triphasés identiques.

La méthode *des pertes séparées* donne des résultats tout au moins aussi précis pour la détermination du rendement. On mesure (à chaud) la résistance des enroulements et l'on mesure les intensités des courants primaire et secondaire; au besoin on les détermine comme il a été indiqué page 153. On a ainsi les pertes dans le

cuivre $r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$. On détermine d'après la courbe des pertes à vide (*fig.* 106) la puissance W_1 perdue dans le fer pour une tension $\mathcal{E}_1 - r_1 I_1$ (généralement $r_1 I_1$ est négligeable devant $\mathcal{E}_1$).

Fig. 108.



Si W est la charge, le rendement est

$$\mathfrak{R} = \frac{W}{W + W_1 + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2}.$$

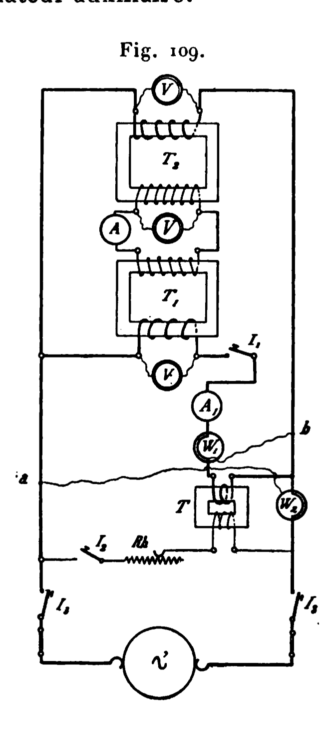
M. Sumpner, au sujet d'une discussion relative à l'accroissement ou à la diminution des pertes dans le fer avec la charge, a indiqué *une méthode d'opposition* pour l'essai des transformateurs applicable quand on possède deux appareils identiques.

La figure 109 donne le schéma du montage à effectuer dans ce cas. Les enroulements à haute tension des deux appareils sont montés en opposition et dans ce circuit on dispose au besoin un a. m., un interrupteur et un v. m.

Les enroulements à basse tension sont disposés en parallèle dans un circuit alimenté par un alternateur (ou la distribution générale au besoin, en disposant alors un rhéostat pour le réglage de la tension). Dans l'un des circuits à basse tension est disposé un interrupteur I_1, un a. m., un w. m. et le circuit à basse tension d'un transformateur dont le circuit à haute tension est également placé en dérivation aux

bornes de la source. Dans ce circuit est intercalé un rhéostat R_h et un interrupteur I_2. Dans le circuit de la source, en avant des dérivations aux transformateurs, est intercalé un w. m. W_2, dont le fil fin est branché en a, en deçà de la dérivation du circuit à haute tension du transformateur auxiliaire.

Fig. 109.



Il faut avoir bien soin de monter les deux appareils en opposition de manière que leurs f. e. m. ne s'ajoutent pas; pour vérifier si le montage est bon, on procède de la manière suivante : on place des plombs de sections très faibles dans le circuit de la source, on ferme les interrupteurs I_3, puis ensuite I_1; si le montage est bien exécuté, il ne circule que le courant de magnétisation des deux appareils et les plombs ne fondent pas (le w. m. W_2 indique la perte de puissance à vide dans les deux appareils); si le montage est mal exécuté, les plombs fondent instantanément.

Quand on a reconnu que le montage est bien exécuté, on remplace les plombs faibles par des plombs pouvant supporter l'intensité normale du courant, et l'on ferme les interrupteurs I_3, I_1 et I_2; on

manœuvre ensuite le rhéostat jusqu'à ce que l'a. m. A_1 indique l'intensité voulue, en même temps que l'on règle la d. d. p. de la source pour que la d. d. p. aux bornes de l'un des appareils soit au-dessus de la valeur normale et l'autre au-dessous. On fait les lectures aux deux w. m. et la somme des puissances indiquées par eux donne le total des pertes dans les deux appareils.

Si l'on dispose d'une source d'électricité donnant la tension normale, on peut procéder de la manière suivante : on fait un premier essai et l'on détermine les pertes totales, puis on inverse les points d'attache de l'un des circuits desservant le transformateur auxiliaire T, on détermine de nouveau les pertes et l'on prend la moyenne des deux déterminations. Dans une des opérations la tension fournie par le transformateur auxiliaire s'ajoute à la tension normale, elle s'en retranche lors de la seconde opération.

Dans ces essais la puissance indiquée par le w. m. W_2 correspond aux pertes dans le fer, et celle indiquée par le w. m. W_1 aux pertes dans le cuivre. Le transformateur auxiliaire joue le rôle de survolteur.

M. G. Kapp [1] a indiqué une méthode d'opposition n'exigeant l'emploi que d'un w. m., mais pour laquelle on doit connaître le rendement du transformateur auxiliaire. Le montage est indiqué sur la figure 110. Un commutateur permet de relier, soit les bornes *a* et *e*, soit les bornes *a* et *b*.

Après avoir essayé, comme il est indiqué ci-dessus, si les deux appareils sont bien montés en opposition, on règle la d. d. p. de la source, puis l'intensité du courant au moyen du rhéostat R_h.

On place d'abord le commutateur dans la position *ab*, et l'on détermine la puissance totale W' fournie par la source; on place ensuite le commutateur dans la position *ac* et l'on détermine la puissance W'' fournie au transformateur auxiliaire. Si $\mathcal{R}$ est le rendement du transformateur auxiliaire, les pertes dans le cuivre sont $\mathcal{R}W''$ et les pertes dans le fer $W' - W''$; les pertes totales sont

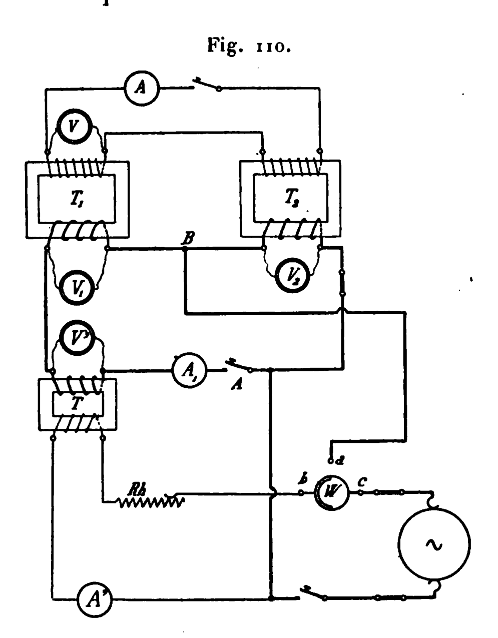
$$W' - W'' + \mathcal{R}W'' = W' - (1 - \mathcal{R})W''.$$

On peut du reste, si l'on a déterminé les résistances des circuits du transformateur auxiliaire T, ainsi que la courbe des pertes à vide en

(1) *Les transformateurs*, par G. Kapp.

fonction des tensions aux bornes, calculer les pertes W″ dans cet appareil, d'après les données des a. m. A_1 et A′ et du v. m. V′. Les pertes totales dans les deux transformateurs essayés sont alors $W' - W''_1$ et l'on n'a qu'un seul relevé au w. m. à faire.

Fig. 110.



Si l'on ne veut pas avoir à tenir compte de la puissance perdue dans les conducteurs de liaison des appareils, il faut naturellement donner à ceux-ci des sections suffisantes pour que leur résistance soit négligeable.

CHAPITRE V.

ESSAIS DES GROUPES ÉLECTROGÈNES.

§ 1. — Détermination du rendement organique d'un moteur à cylindre.

Le rendement organique d'un moteur à cylindre est le rapport entre la *puissance effective ou utile* mesurée à la poulie et la puissance du fluide agissant sur le piston ou *puissance indiquée*.

La puissance utile étant T_u et la puissance indiquée T_i, le rendement organique du moteur est

$$\mathcal{R} = \frac{T_u}{T_i}.$$

$T_i - T_u$ est la perte organique du moteur, qui est due aux résistances passives.

Dans le cas d'une machine à vapeur, on comprend ordinairement dans les pertes organiques la puissance dépensée pour actionner le condensateur, quand celui-ci n'est pas commandé par un moteur spécial.

Les autres pertes sont dues principalement aux frottements :

1° Des garnitures des pistons et des presse-étoupes;
2° De la crosse des pistons;
3° Des articulations des bielles;
4° Des tourillons de l'arbre;
5° Des organes de distribution.

Dans les moteurs à grande vitesse la résistance de l'air entre également en ligne de compte.

Dans les moteurs à gaz, les pertes organiques sont également dues aux frottements; en outre, on y fait souvent rentrer, principalement pour les moteurs à quatre temps, avec régulation de vitesse par sup-

pression d'admission, le travail de compression du mélange détonant.

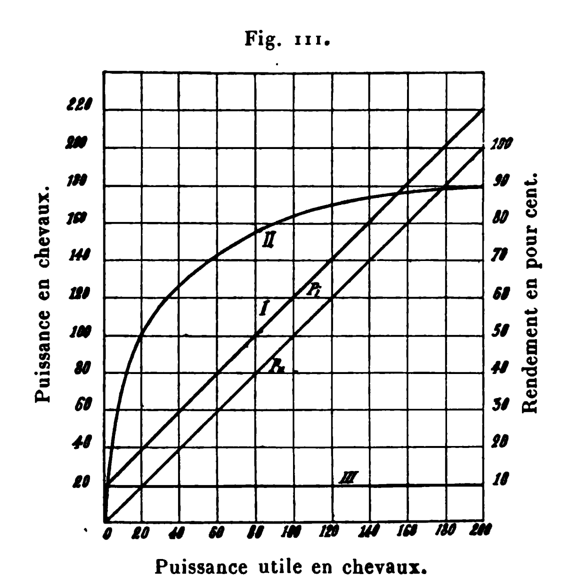
Dans les moteurs à vapeur, on peut admettre sans grande erreur que les pertes organiques T_0 sont constantes, quelle que soit la charge, jusqu'à la charge normale. Comme on a :

$$\mathcal{R} = 1 - \frac{T_0}{T_i},$$

on voit que le rendement croît avec la charge. Les pertes organiques varient entre 8 et 15 pour 100 de la puissance à pleine charge. Toutes choses égales d'ailleurs, le rendement organique des machines à plusieurs cylindres n'est pas inférieur à celui des machines monocylindriques.

M. Thurston (¹), dans une série d'essais qu'il a entrepris sur un grand nombre de machines à vapeur de divers types, a constaté que la perte due au frottement des tourillons de l'arbre constitue la plus grande part des pertes organiques (35 à 47 pour 100).

Fig. 111.



Les frottements du piston et de la tige viennent en seconde ligne

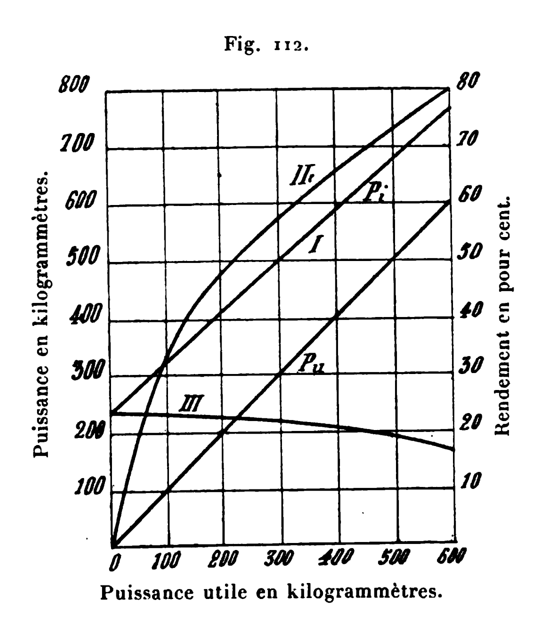
(¹) THURSTON, *Essais des machines à vapeur*.

dans les machines à distributions équilibrées, tandis que dans les machines à tiroirs ordinaires les frottements de la distribution prennent le second rang, ceux du piston et de la tige venant alors en troisième ligne.

Les courbes de la figure 111 se rapportent à des essais de M. Delafont sur une machine à distribution Corliss de 200^{chx}, monocylindrique, la courbe I donne la puissance indiquée, la courbe II le rendement et la courbe III les pertes organiques en fonction de la puissance utile.

Les pertes organiques dans les moteurs à gaz varient entre 10 et 20 pour 100 de la puissance à pleine charge, elles ne peuvent en général être considérées comme constantes, quelle que soit la charge, principalement quand la puissance nécessaire à la compression est

Fig. 112.



Puissance utile en kilogrammètres.

comptée dans ces pertes. Dans le cas de régulation du t/m. par des ratés d'explosion, comme il y a beaucoup plus de ratés (occasionnant uniquement une perte de puissance) à faible charge qu'aux charges élevées, les pertes organiques diminuent en général avec la charge. C'est ce que montre la figure 112 dont les courbes donnent les résultats d'essais de M. Aimé Witz. La courbe I donne la puissance

indiquée, la courbe II le rendement organique et la courbe III les pertes organiques en fonction de la charge.

La *puissance utile* d'un moteur se détermine, soit par des essais au frein, soit d'après la puissance recueillie aux bornes de génératrices qu'il actionne et dont on a déterminé le rendement, ainsi qu'au besoin celui de la transmission intermédiaire.

Détermination de la puissance indiquée. — Les indicateurs permettent de déterminer la pression moyenne de la vapeur ou du mélange détonant par unité de surface utile (ordinairement le centimètre carré) du piston. Si c est la course du piston en mètres, s sa surface utile (surface totale diminuée de la section de la tige) en centimètres carrés, p_1 la pression moyenne du fluide pendant la course considérée, le travail correspondant à cette course sur la face considérée du piston sera de $p_1 sc$ k.g.m. Pour la course en sens inverse, si p_2 est la contre-pression moyenne du fluide, le travail sera $p_2 sc$ k.g.m. et doit être compté négativement.

Le travail sur la face considérée du piston pour une double course, correspondant à un tour du volant, sera

$$(p_1 - p_2)\, sc = psc \text{ k.g.m.}$$

Les diagrammes permettent de déterminer la valeur de p.

Si la machine est à double effet et si p' représente la valeur p pour l'autre face dont la section utile est s' (s' pouvant être différent de s, par suite de différences dans les sections des tiges), le travail par tour du volant sur cette face sera $p's'c$.

Le travail par tour du volant pour le cylindre considéré sera

$$c(ps + p's') \text{ k.g.m.}$$

La puissance indiquée ou travail par seconde sera, si N et le t/m. de l'arbre, si la machine comporte plusieurs cylindres :

$$P_k = \frac{N}{60} \sum c(ps + p's') = 0{,}0167\, N \sum c\,(ps + p's') \text{ kilogrammètres.}$$

$$P_c = 0{,}00022\, N \sum c\,(ps + p's') \text{ chevaux.}$$

$$P_w = 0{,}1635\, N \sum c\,(ps + p's') \text{ watts.}$$

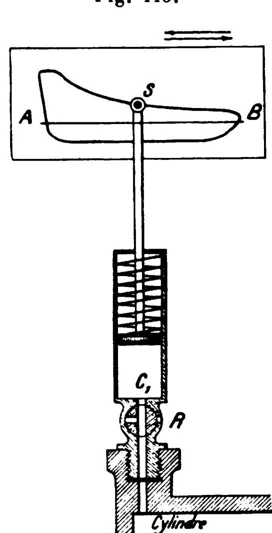
Les mêmes relations sont à employer pour les moteurs à gaz à deux temps. Si les moteurs sont à simple effet les valeurs de s' sont nulles.

Nous étudierons plus loin les relations à employer dans le cas des moteurs à gaz à quatre temps.

Indicateurs. — L'indicateur a été imaginé et employé par Watt en 1814; l'appareil de Watt est constitué comme il suit:

Un petit cylindre c (*fig.* 113) est mis en communication avec une

Fig. 113.



des extrémités du cylindre de la machine à vapeur au moyen d'une conduite munie d'un robinet R. Dans ce petit cylindre se meut un piston, sous la face inférieure duquel peut agir la vapeur. La face supérieure de ce piston est fixée à l'extrémité d'un ressort, dont l'autre extrémité est attachée en un point à la partie supérieure du cylindre c.

Le piston porte une tige verticale, à l'extrémité supérieure de laquelle est fixé un crayon s dont la pointe vient appuyer sur une feuille de papier fixée sur une planchette. Cette dernière est reliée à la tige du piston et entraînée dans son mouvement de va-et-vient.

Si l'on ferme la communication entre le cylindre de l'indicateur

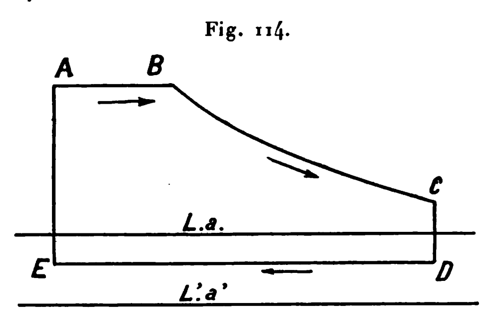
et celui de la machine, la face inférieure du petit piston est soumise à la pression atmosphérique, comme la face supérieure, et le crayon marque sur le papier animé du mouvement de va-et-vient une ligne droite AB que l'on désigne sous le nom de *ligne atmosphérique*.

Quand on met le cylindre de l'indicateur en communication avec celui de la machine à vapeur, la face inférieure du petit piston est soumise à la pression de la vapeur, tandis que sa face supérieure est soumise à la pression atmosphérique. Si la pression de la vapeur est plus grande que la pression atmosphérique, le ressort est comprimé et le piston se déplace au-dessus de la position d'équilibre, d'une quantité proportionnelle à la pression de la vapeur (au-dessus de la pression atmosphérique). Si, au contraire, la pression de la vapeur descend au-dessous de la pression atmosphérique, le piston descend au-dessous de sa position d'équilibre.

Pour chaque tour de la manivelle, le crayon trace sur le papier une figure fermée. Les abscisses donnent à chaque instant le point correspondant de la course du piston et les ordonnées (comptées à partir de la ligne atmosphérique, sont proportionnelles à la pression de la vapeur à l'instant correspondant.

Si les orifices d'admission et d'échappement s'ouvraient et se fermaient instantanément en plein, le diagramme par tour pour une face du piston d'une machine à vapeur aurait la forme indiquée sur la figure 114.

Fig. 114.



AB admission, BC détente, pour la course Æ N (arrière, avant), DE, échappement course NÆ.

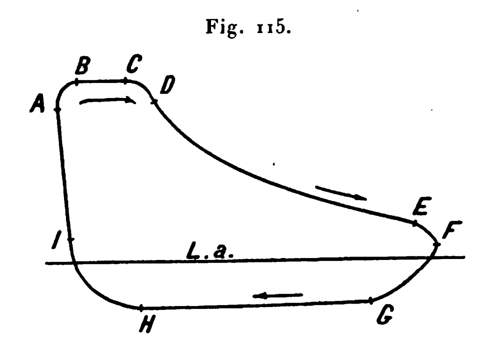
La ligne DE étant au-dessus de la ligne atmosphérique, dans le cas d'un moteur à échappement libre, au-dessous dans le cas d'un moteur à condensation.

Il est facile de voir que le travail de la vapeur sur la face considérée du piston est représenté par l'aire fermée ABCDE. L'ordonnée moyenne de cette surface est proportionnelle à la pression moyenne p.

Connaissant l'échelle du ressort on peut donc déduire du diagramme la valeur de la pression moyenne.

Comme l'ouverture et la fermeture des orifices d'admission et d'échappement n'ont pas lieu brusquement, le diagramme est modifié.

Fig. 115.



Le diagramme figure 115 est celui d'une bonne machine fonctionnant à charge normale.

AB correspond à l'ouverture de l'admission,

BC correspond à l'admission,

CD correspond à la fermeture de l'admission,

DE correspond à la détente.

En E l'échappement commence à ouvrir et en G il est ouvert en plein.

GH correspond à l'échappement.

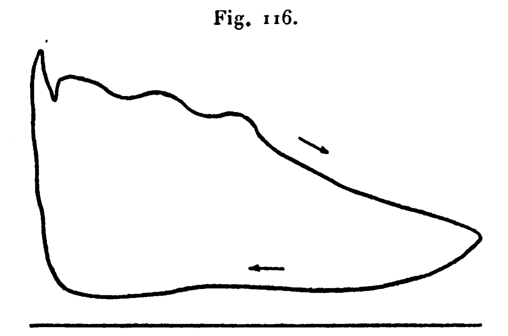
En H l'échappement commence à fermer, il ferme complètement entre H et I en même temps que la contrepression commence.

Anomalies des diagrammes. — Quelques-unes sont dues à l'indicateur lui-même, d'autres à la machine à vapeur.

Des crochets, au commencement de la course avant (*fig.* 116) et des ondulations dans la détente indiquent que l'indicateur a trop d'inertie, mais, cependant, le diagramme n'est pas faux tant qu'il n'y a pas de crochets brusques.

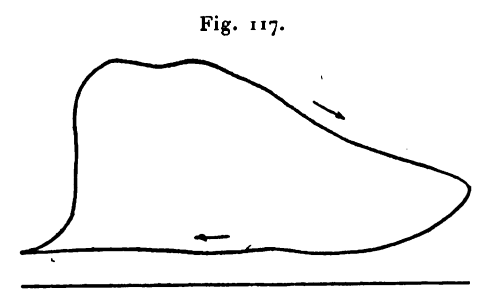
Une ligne brisée et irrégulière indique la présence d'un grain de

Fig. 116.



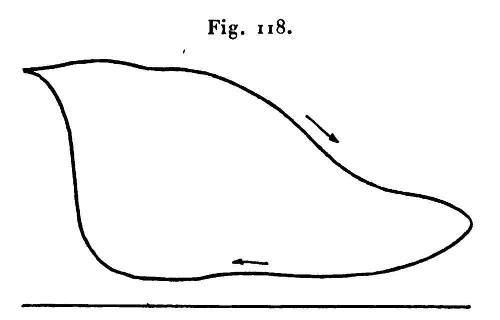
sable ou de poussière dans l'indicateur, ce qui l'empêche de fonctionner convenablement.

Fig. 117.



Le diagramme de la figure 117 indique que la machine à vapeur n'a pas de compression et qu'il y a retard à l'admission.

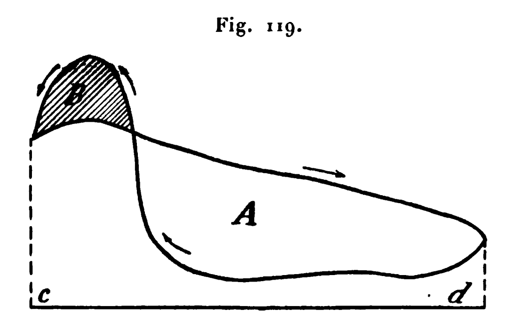
Fig. 118.



Dans le diagramme de la figure 118, il y a trop de compression et retard à l'admission.

Il peut y avoir une compression tellement forte que la pression d'admission est dépassée ; dans ce cas, la partie hachurée du diagramme figure 119 doit être comptée négativement.

Fig. 119.



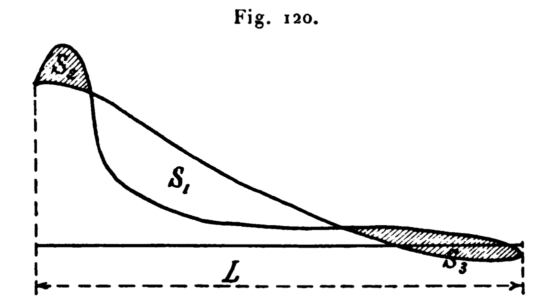
L'ordonnée moyenne est alors

$$\frac{\text{surface A} - \text{surface B}}{cd}.$$

La détente peut être trop prolongée, de sorte que la vapeur à la fin de la détente peut avoir une pression inférieure à celle de l'échappement et même à la pression atmosphérique dans le cas de l'échappement à l'air libre.

Le diagramme de la figure 120 est celui du grand cylindre d'une machine à vapeur compound sans condensation, quand cette der-

Fig. 120.



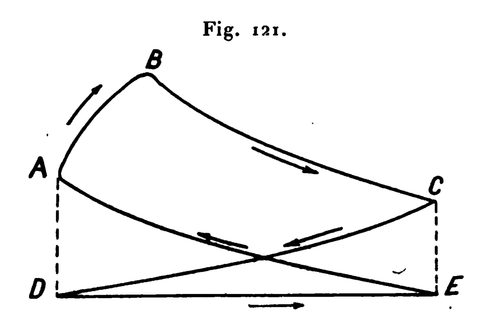
nière fonctionne à vide ; il y a, à la fois, trop de compression et détente trop prolongée. Les deux parties hachurées doivent être comptées négativement. Elles peuvent être plus grandes que la surface intermédiaire ($s_2 + s_3 > s_1$), de sorte que l'ordonnée moyenne

est alors négative, c'est-à-dire que le grand cylindre, dans le fonctionnement à vide, absorbe, dans ce cas, du travail au lieu d'en produire.

Diagramme des moteurs à gaz. — On construit actuellement des moteurs à gaz à simple ou double effet, et à deux ou quatre temps.

Le diagramme d'un moteur à quatre temps (*fig.* 121) se ferme

Fig. 121.



au bout de deux doubles courses du piston (deux tours du volant).

On a

1° Tour de la manivelle....	*a.* course avant....	AB, explosion. BC, détente.
	b. course arrière...	CD, expulsion des gaz de la combustion.
2° Tour de la manivelle....	*a.* course avant....	DE, admission du mélange détonant.
	b. course arrière...	EA, compression du mélange détonant.

La partie utile du diagramme, c'est-à-dire celle servant à déterminer la pression moyenne, est ABCDA, c'est-à-dire que le travail de compression se compte avec les pertes organiques.

La vitesse des moteurs à gaz à quatre temps peut se régler de deux manières :

a. par variation de la quantité de gaz entrant dans le mélange détonant.

b. par suppression d'un certain nombre d'explosions.

Quand le réglage se fait par la variation de la quantité de gaz du

mélange, il y a une explosion tous les deux tours de la manivelle.

La puissance indiquée en kilogrammètres est :

$$0,00833\ Npsc.$$

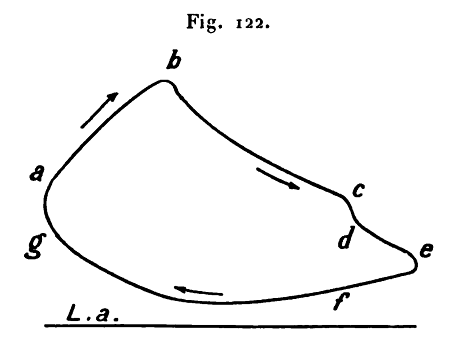
pour un moteur à simple effet.

Quand le réglage a lieu par suppression d'explosions, on détermine le nombre d'explosions à la minute, soit au bruit, soit en plaçant un compteur sur la cause provoquant l'admission du gaz; si n est le nombre d'explosions par minute, on a comme puissance indiquée (pour une face du piston)

$$0,0167\ npsc \text{ kilogrammètres.}$$

Dans le cas des moteurs à gaz à deux temps, une pompe auxiliaire sert à la compression préalable des gaz, le diagramme a alors l'allure représentée figure 122.

Fig. 122.



Course avant......	*ab*, explosion. *bc*, détente. *de*, expulsion des produits de la combustion
Course arrière.....	*ef*, admission du mélange sous pression. *fg*, compression.

Dans ce cas, on voit que dans le calcul de l'ordonnée moyenne, si l'on prend pour surface utile *abcdefg*, on ne compte pas dans les pertes organiques le travail de compression dans le cylindre (le travail de compression préalable du mélange est compté, par contre, dans les pertes organiques).

Calcul des diagrammes. — Si l est la longueur du diagramme, s la surface (les plages négatives déduites), l'ordonnée moyenne om est $\frac{s}{l}$, ce qui permet, connaissant l'échelle du ressort de l'indicateur, de déterminer la pression moyenne.

La surface peut être mesurée au moyen d'un planimètre et même certains de ces instruments donnent directement la valeur de l'ordonnée moyenne.

Un moyen assez expéditif, quand on a un grand nombre de diagrammes à calculer, est de les décalquer sur du papier bien huilé, et de les coller sur une feuille de clinquant ou de métal mince, bien homogène. On découpe ensuite le métal et l'on plonge le morceau dans de l'eau pour enlever le papier. On pèse ensuite les morceaux ainsi obtenus et le poids est proportionnel à la surface. On a préalablement découpé en divers points de la feuille métallique, des pièces de surface donnée, que l'on a pesées pour se rendre compte, et de l'homogénéité de la feuille de métal et du poids par unité de surface.

On peut également décalquer le diagramme sur du papier transparent, porter le décalque sur du papier quadrillé au millimètre et compter le nombre de millimètres carrés.

On peut aussi tracer des lignes équidistantes perpendiculaires à la ligne atmosphérique, la première et la dernière étant à un demi-intervalle des extrémités du diagramme; on totalise, au moyen d'une bande de papier par exemple, les ordonnées, et l'on divise la longueur totale par le nombre d'ordonnées. Les constructeurs fournissent ordinairement, avec les indicateurs, des grilles articulées permettant de tracer facilement les ordonnées.

On a encore indiqué diverses méthodes pour déterminer l'ordonnée moyenne ; l'une des plus employées est celle de Simpson :

On trace sur le diagramme, perpendiculairement à la ligne atmosphérique, n ordonnées équidistantes, n étant impair; si z_1, z_2, z_3, sont les longueurs des ordonnées, on a

$$O_m = \frac{1}{3(n-1)}[z_1 + zn + 4(z_2 + z_4 + \ldots) + 2(z_3 + z_5 + \ldots)].$$

Une condition essentielle pour obtenir par cette méthode des résultats exacts, est que, s'il y a des points d'inflexion, ils correspondent à des ordonnées de rang impair.

Emploi et tarage des indicateurs. — L'indicateur de Watt, tel qu'il a été décrit, n'est pas d'un emploi commode, il est très difficile d'installer la planchette.

Mac Naught a remplacé cette dernière par un tambour sur lequel est disposé le papier ; ce tambour est monté de manière que son axe soit parallèle à celui du cylindre de l'indicateur, de sorte que le crayon se déplace suivant une de ses génératrices, quand il est immobile. Le tambour reçoit de la machine à expérimenter un mouvement alternatif, dont la vitesse mesurée sur la circonférence est à chaque instant proportionnelle à celle du piston de la machine. Le déplacement du tambour est obtenu au besoin au moyen d'une ficelle venant s'enrouler sur une gorge à la partie inférieure et cette ficelle agit par traction sur le tambour, lorsque le piston avance dans un sens. Pour la course en sens inverse, le mouvement du tambour est produit par l'action d'un ressort placé dans un barillet au centre du tambour; la raideur de ce ressort doit être suffisante pour que, même à la fin de sa course, la ficelle reste bien tendue.

Comme la course de la ficelle est au plus égale à la circonférence du tambour, il faut, si l'on veut diminuer les dimensions de ce dernier, réduire le mouvement; ceci peut s'obtenir de diverses manières; l'un des systèmes les plus simples est l'emploi de poulies réductrices. Un fil attaché à la crosse du piston, et passant sur diverses poulies de renvoi vient s'enrouler et se dérouler sur une poulie d'assez grand diamètre. Le fil commandant le tambour s'enroule sur une poulie d'un diamètre moindre, solidaire de la première.

Les fils subissent des efforts variés et leur allongement ou leur raccourcissement aurait pour effet d'enlever la proportionnalité entre le mouvement de rotation du tambour et la course du piston de la machine. Il faut donc employer des fils subissant le moins d'allongement possible; pour cela on choisit des cordelettes en chanvre bien tressées et bien étirées, des petits fils d'acier ou de laiton, des cordes à piano, etc.

Dans l'indicateur Mac Naught, les ordonnées du diagramme sont égales aux déplacements du petit piston. Pour que ces ordonnées aient une longueur suffisante, il faut que le ressort soit long; il présente alors beaucoup d'inertie et il est difficile d'arriver à ce que ses allongements soient bien exactement proportionnels aux pressions.

Afin de pouvoir employer des ressorts plus courts, on amplifie la

course du crayon, au moyen d'un mécanisme à fléaux très légers, mais il faut alors que la course du crayon soit aussi rectiligne que possible. Avec ce système, on peut approcher ou éloigner le crayon du papier pendant le fonctionnement, en montant les fléaux et le crayon sur une sorte de charnière.

Pour que le diagramme soit bien exact (particulièrement dans le cas de basses-pressions, où les ressorts pour donner une ordonnée suffisante sont faibles), on doit faire appuyer aussi peu que possible le crayon sur le papier. On emploie pour cela, soit une pointe en plomb doux, soit mieux une pointe émoussée en métal dur, le papier étant alors recouvert d'une couche de blanc de zinc.

Il faut que dans un indicateur les masses en mouvement aient un poids aussi faible que possible; dans chaque appareil il y a une vitesse à laquelle les ondulations dues à l'inertie commencent à se montrer dans les diagrammes. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le ressort est plus raide. Ainsi, d'après M. Reynolds, un indicateur ayant un ressort donnant des ordonnées de 1 pouce pour une pression de 20 livres par pouce carré (ordonnée de $2^{cm},54$ pour une pression de $1^{kg},4$ par centimètre carré), donne des ondulations lorsque la vitesse est de 6c t/m., tandis que pour un ressort produisant des ordonnées de 1 pouce pour une pression de 100 livres par pouce carré (ordonnée de $2^{cm},54$ pour une pression de 7^{kg} par centimètre carré) les ondulations ne commencent qu'à 155 t/m.

M. Garnier construit, d'après un principe donné par Hirn, un indicateur qui doit être employé pour les machines à grande vitesse. La course du piston de l'indicateur est limitée par deux taquets, de sorte que le déplacement est assez faible pour que l'influence de l'inertie ne se fasse pas sentir. L'ensemble des deux taquets se déplace automatiquement au moyen d'une vis, de manière à obtenir le diagramme complet par parties successives. Il faut naturellement, pour que ce procédé soit applicable, que la loi des pressions reste la même pendant toute la durée des relevés.

MM. Hospitalier et Carpentier ont construit tout dernièrement [1] un indicateur qu'ils ont désigné sous le nom de *manographe,* qui peut être employé pour les moteurs à très grande vitesse, et avec lequel on obtient des diagrammes photographiés.

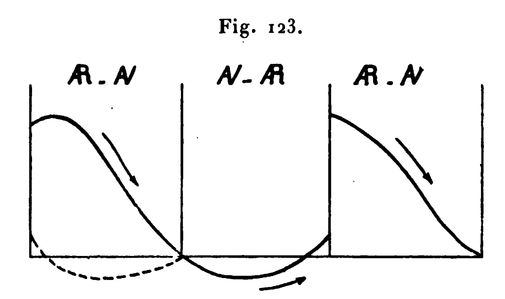
---

(1) Voir *La Nature* du 4 janvier 1901.

Quand on a affaire à une machine dont le travail varie d'un tour à l'autre, on peut employer l'indicateur Guinotte qui s'applique plus spécialement aux machines d'extraction de mines. Dans cet indicateur le mouvement de tambour, tout en étant proportionnel au déplacement du piston, a toujours lieu dans le même sens ; on obtient alors un trait continu (*fig.* 123).

Cet appareil permet donc d'étudier l'effet de la variation de charge.

Fig. 123.



L'approximation que l'on peut atteindre avec les indicateurs est de près de 1 pour 100, mais il faut procéder avec soin et bien observer les règles suivantes :

1° L'indicateur doit être placé aussi près que possible de l'extrémité du cylindre, et doit y être relié par une conduite large et sans coudes.

Dans des essais sérieux on doit employer un indicateur pour chacune des extrémités de chaque cylindre et les relevés doivent avoir lieu simultanément au commandement.

2° On doit au préalable tracer la ligne atmosphérique, en procédant de la manière suivante :

On commence par appuyer sur la tête de la tige du piston de l'indicateur, de manière à comprimer le ressort, puis on le laisse ensuite se détendre librement et l'on trace une ligne, en tirant sur la ficelle de manière à faire tourner le cylindre enregistreur tout en appuyant le crayon contre le papier. On procède ensuite d'une manière analogue, mais en allongeant au préalable le ressort et l'on trace encore une ligne. Les deux lignes horizontales ainsi tracées doivent se confondre, sans cela il faut revoir l'indicateur qui a du dur.

3° Avant d'appuyer le crayon sur le papier pour relever un dia-

gramme, il faut laisser le ressort de l'indicateur se réchauffer; pour cela, après avoir ouvert le robinet et purgé, on doit laisser fonctionner l'appareil pendant quelques minutes à blanc.

4° Chaque diagramme doit être relevé au moins deux fois successivement; pour qu'un diagramme soit valable il faut que les lignes se recouvrent presque exactement.

Tarage du ressort de l'indicateur. — On doit vérifier si les déplacements du stylet sont bien proportionnels à la pression de la vapeur et si l'échelle indiquée est bien exacte. On doit vérifier le tarage avant chaque série d'essais et, si ceux-ci sont de longue durée, on doit tarer à nouveau à la fin; si l'échelle a varié on prend la moyenne.

Pour faire un tarage bien exact, on doit disposer d'une conduite de vapeur sur laquelle on place les indicateurs à tarer, ainsi qu'un manomètre étalon.

On place un papier sur le tambour de chaque indicateur et l'on fait tracer, en faisant tourner le tambour à la main, la ligne horizontale de la pression atmosphérique.

On fait communiquer ensuite l'indicateur avec la conduite de vapeur; on fait monter peu à peu la pression dans cette conduite en ouvrant plus ou moins le robinet général, et l'on trace pour chaque indicateur les lignes horizontales correspondant à diverses pressions indiquées par le manomètre étalon.

On ferme ensuite la communication de la conduite avec la chaudière, de sorte que la vapeur se condense dans la conduite et l'on trace une ou deux lignes correspondant à une pression inférieure à la pression atmosphérique.

(Dans ces essais, il faut avoir soin, avant de tracer les lignes à diverses pressions, de laisser d'abord le ressort de l'indicateur se réchauffer; en effet, les allongements à chaud sont supérieurs aux allongements à froid et la différence atteint 1 à 3 pour 100; le ressort est moins raide à chaud qu'à froid.)

Quand on ne dispose pas d'une conduite de vapeur ou d'un manomètre étalon, on peut se rendre compte approximativement de la qualité d'un ressort (de 1 à 3 pour 100 près, puisque l'on opère à froid) de la manière suivante :

On maintient l'appareil renversé bien verticalement en le plaçant

par exemple entre les mâchoires d'un étau, et l'on trace, en faisant tourner le tambour à la main, la ligne correspondant à la pression atmosphérique. On place ensuite au-dessus du piston une tige terminée par un plateau sur lequel on peut disposer des poids. On met sur le plateau un poids donné et l'on trace la ligne correspondante sur le tambour. On place ensuite un autre poids, on trace la ligne correspondante, etc.

Si s est la section du piston en centimètres carrés, p le poids du plateau et de sa tige, p_1 le poids placé sur le plateau, p et p_1 étant la pression en kilogrammes, la pression sur le ressort en kilogrammes par centimètre carré sera $\frac{p+p_1}{s}$. On mesure sur le papier l'ordonnée comprise entre la ligne atmosphérique et celles correspondantes aux divers poids et l'on voit si elles sont bien proportionnelles aux poids totaux; on détermine l'échelle à 1 ou 3 pour 100 près.

Dans ces essais, il faut bien veiller à ce que la tige du plateau ne frotte pas contre les parois du cylindre de l'indicateur, car ces frottements pourraient fausser les résultats; pour arriver à l'équilibre bien exact, on appuie légèrement sur le plateau et on lui donne quelques légers chocs.

Pour déterminer le *rendement organique* d'un moteur à vapeur ou d'un moteur à gaz, on commence par relever les diagrammes, le moteur fonctionnant à vide, en déterminant le nombre de t/m. On installe ensuite le frein et on le charge de poids croissants, en relevant chaque fois les diagrammes et en comptant les t/m. L'opérateur chargé de compter les tours commande à ceux qui doivent relever les diagrammes. L'opérateur placé au frein avertit celui chargé du comptage des tours, que l'équilibre est obtenu; ce dernier commence à compter les tours; au bout de 20 secondes environ, il commande de relever les diagrammes, et arrête le comptage des tours au bout d'une minute. Pour qu'une opération soit valable, le frein doit être bien en équilibre pendant toute la durée des relevés.

On marque sur chaque diagramme le numéro du relevé, le cylindre auquel il se rapporte et le côté de ce cylindre. Par exemple, n° 2 G. Æ indiquera un diagramme du deuxième relevé pour la partie arrière du grand cylindre de la machine.

Le modèle de la feuille à tenir, lors de cet essai, est donné sous le n° 9, à la fin du Volume.

Ce Tableau permet de se rendre compte de la variation du nombre de tours de la machine suivant la charge.

Rendement organique d'un groupe électrogène. — On procède à la détermination du rendement organique d'un groupe électrogène de la même manière que pour un moteur; la puissance utile est déterminée par des relevés à l'a. m. et au v. m. ou au w. m., et la puissance indiquée au moyen de l'indicateur.

Si, d'autre part, on a déterminé le rendement de la dynamo génératrice, ainsi que le rendement organique du moteur, on peut en déduire le rendement de la transmission, mais l'approximation est assez faible.

Régularité d'allure. — Les essais d'un moteur ou d'un groupe électrogène doivent porter sur la régularité d'allure du moteur.

Il y a deux choses à considérer :

1° *La régularité du nombre de tours par minute.* Quand la charge varie, le nombre de tours du moteur tend à se modifier, mais alors intervient l'action du régulateur. Il ne faut pas que la variation du nombre de tours dépasse une certaine limite à fixer dans chaque cas. L'essai se fait en plaçant un tachymètre sur le moteur et en faisant varier brusquement la charge, soit de la dynamo génératrice, soit du frein. On note les oscillations maxima de l'aiguille du tachymètre, soit au-dessus, soit au-dessous de la position normale. Le mieux est d'employer à cet effet un tachymètre enregistreur ou un cinémographe.

2° Il y a lieu également de considérer *la régularité d'allure de la machine dans un tour.* On s'est beaucoup occupé de cette question ces derniers temps, mais aucune méthode donnant une approximation suffisante n'a été indiquée pour la mesure, soit de l'angle de décalage (entre un rayon du volant et un rayon idéal tournant au même t/m., mais avec une vitesse uniforme), soit du coefficient d'irrégularité; le plus sûr est de déterminer par le calcul, le coefficient d'irrégularité ainsi que l'angle de décalage [1].

---

[1] *Voir* le *Bulletin de la Société internationale des Électriciens,* novembre 1901 et l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 14 août 1900.

En pratique, on peut se rendre compte approximativement de la régularité d'allure d'un moteur en faisant actionner directement par ce moteur une dynamo à courant continu, dans le circuit de laquelle on intercale des lampes à incandescence. En employant des lampes un peu poussées, c'est-à-dire fonctionnant au-dessus de leur tension normale, on peut, en regardant une feuille de papier blanc éclairée par ces lampes, se rendre compte si la lumière est plus ou moins fixe. Quand la lumière est bien fixe, le coefficient d'irrégularité est inférieur à $\frac{1}{80}$ et même certaines personnes aperçoivent des variations pour un coefficient supérieur à $\frac{1}{120}$, ce coefficient étant défini comme le rapport de la différence entre la vitesse maximum et la vitesse minimum à la vitesse moyenne.

§ 2. — Essais de consommation.

CONSOMMATION D'UN GROUPE, CHAUDIÈRE, MACHINE A VAPEUR ET DYNAMO.

Comme on peut être appelé à faire des essais isolément, nous étudierons d'abord la consommation d'une chaudière, puis celle de la machine à vapeur.

1° *Essai d'une chaudière.*

Lors de l'essai, on cherche à déterminer le rendement calorifique de la chaudière et la quantité d'eau réellement vaporisée par kilogramme de charbon employé.

Le rendement calorifique d'une chaudière est le rapport du nombre de calories, de la vapeur sèche fournie par la chaudière, au nombre de calories, fournies par le charbon employé.

Le rendement calorifique d'une chaudière peut atteindre une valeur voisine de 80 pour 100.

Pour déterminer le rendement calorifique de la chaudière, il faut connaître :

1° Le pouvoir calorifique du charbon ;

2° Le poids P de charbon brûlé pendant l'essai ;

3° Le volume V_1 en litres de l'eau contenue dans la chaudière au commencement de l'essai et la température T_1 de cette eau ;

4° Le volume V_2 de l'eau contenue dans la chaudière à la fin de l'essai, et la température T_2 de cette eau ;

5° Le poids Q_v de la vapeur sèche fournie par la chaudière, et la température T_d de cette vapeur;

6° Le poids Q_d de l'eau d'alimentation et sa température t.

Pouvoir calorifique du charbon. — Les houilles ont été classées d'après leur teneur en hydrogène et en oxygène, par M. Grüner, dans le Tableau suivant :

Désignation.	Composition moyenne. C.	H.	O.	Résidu de la carbonisation.	Puissance calorifique moyenne. pur et sec.	ordinaire.
Anthracite	94	3, 0	3,0	91	9200	8000
Houille maigre	90,5	3, 5	5,0	86	9350	8200
Houille grasse à courte flamme	88	4, 5	7,0	78	9450	8450
Houille maréchale	85	5,15	10,0	71	9050	8050
Houille grasse à longue flamme	82,5	5, 5	11,5	64	8650	7750
Houille sèche à longue flamme	78	5,25	17,5	55	8250	7500
Lignite	72	5,25	27,5	45	6750	6000

Au fur et à mesure que la proportion d'hydrogène en excès sur celle qui est nécessaire pour s'unir à l'oxygène contenu dans le combustible augmente, les houilles donnent de plus en plus d'hydrocarbures, elles sont plus flambantes et produisent de moins en moins de coke.

L'anthracite est plus dense que les houilles; il se rapproche du carbone solide; son emploi exige des foyers volumineux et de grandes grilles, car il met plus longtemps à brûler que les autres charbons.

Les houilles maréchales et les houilles grasses à longue flamme (qui sont employées pour la fabrication du gaz) ne conviennent pas pour les grilles; elles sont collantes et empêchent l'accès de l'air.

Les houilles les meilleures pour les chaudières sont les houilles grasses à courte flamme ou demi-grasses et les houilles sèches à longue flamme; les premières se rapprochent de l'anthracite et brûlent assez lentement. Les houilles sèches à longue flamme brûlent beaucoup plus vite; aussi exigent-elles des grilles de faible dimension, mais la conduite du feu est pénible à cause des chargements fréquents.

Le charbon peut être employé en morceaux plus ou moins gros, ou sous forme d'agglomérés. Les agglomérés ou briquettes sont

obtenus au moyen de menus de charbons cimentés par du brai, c'est-à-dire de goudron plus ou moins concentré.

Les charbons produisent des cendres en plus ou moins grande proportion, ordinairement de 5 à 10 pour 100.

Quand la proportion de cendres dépasse 12 à 15 pour 100, celles-ci nuisent très sérieusement à la conduite du feu.

Les cendres de certaines houilles forment un silicate très fluide, encrassant et attaquant les grilles, que l'on a nommé pour cette cause *mâchefer*.

Certaines houilles pyriteuses contiennent beaucoup de soufre ; à la combustion elles donnent des produits sulfureux, dont la condensation sur les tôles froides à la faveur de l'humidité peut donner de l'acide sulfurique qui ronge le fer.

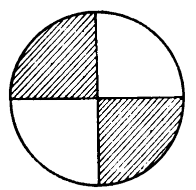
Les agglomérés sont débarrassés en grande partie des cendres par le lavage ; ils donnent peu de mâchefer et ont peu de soufre.

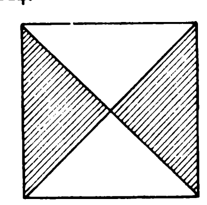
Afin d'avoir, pour la détermination du pouvoir calorifique, une portion de combustible ayant bien la composition moyenne, on peut procéder au prélèvement d'une prise d'essai de la manière suivante :

On prend dans chaque wagon, dans chaque tombereau ou dans chaque tas de combustibles, deux ou trois pelletées dans des endroits différents.

Le charbon ainsi obtenu est cassé en morceaux de la grosseur du poing, puis étalé sur le sol en un tas rectangulaire ou rond (*fig.* 124)

Fig. 124.





de hauteur bien uniforme. On trace sur le tas les deux diagonales, dans le cas où il est rectangulaire, ou deux diamètres à angles droits, dans le cas où il est rond, et l'on enlève deux des portions opposées par le sommet.

Les deux portions restantes sont cassées en morceaux plus petits, remises en tas et l'on procède comme ci-dessus, en retirant deux

portions opposées par le sommet. On procède ainsi en cassant le charbon en morceaux de plus en plus petits, jusqu'à ce qu'il reste environ 1 litre de charbon, de la grosseur d'un pois. On met alors le charbon dans une bouteille bien sèche que l'on cachète.

La détermination du pouvoir calorifique du charbon se fait alors sur une partie de la prise d'essai, soit au moyen de la bombe calorimétrique, soit par l'analyse chimique.

La bombe calorimétrique, due à M. Berthelot, comprend une chambre de combustion fermée, à parois très résistantes, revêtues intérieurement de platine. On y introduit un poids donné du combustible à essayer et l'on remplit avec de l'oxygène à 25^{atm}. Le combustible est ensuite allumé par une étincelle électrique, la bombe étant plongée dans le bain calorimétrique.

M. Malher a modifié un peu la bombe calorimétrique; son appareil, connu sous le nom d'*obus calorimétrique,* est moins coûteux et permet cependant d'obtenir des résultats suffisants pour la pratique. Au moyen de la bombe ou de l'obus on peut déterminer également la puissance calorifique des gaz.

Si le combustible contient par kilogramme C^{kg} de carbone, H^{kg} d'hydrogène, S^{kg} de soufre, O^{kg} d'oxygène et E^{kg} d'eau hygrométrique, la puissance calorifique, en grandes calories, est

$$8100\,C + 2900\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500\,S - 637\,E.$$

En employant cette relation, on admet, comme l'a indiqué Dulong, qu'une partie de l'hydrogène seulement, celle qui n'est pas combinée avec l'oxygène du charbon, participe à la combustion; on admet en outre que l'eau hygrométrique se dégage comme vapeur à 100°.

On a ainsi une donnée suffisamment exacte pour la pratique.

L'emploi de la méthode chimique pour la détermination du pouvoir calorifique du combustible est particulièrement commode quand on a à procéder à des essais de longue durée.

En effet, la quantité d'eau hygrométrique est variable suivant les jours. On fait procéder à l'analyse de la prise d'essai sèche et ensuite on n'a plus qu'à déterminer la quantité d'eau hygrométrique contenue dans le combustible au jour donné.

On détermine la quantité d'eau hygrométrique en portant un échantillon dans une étuve chauffée vers 120°. On pèse de temps en

temps l'échantillon et l'on arrête quand deux pesées successives donnent le même résultat.

On déduit ensuite facilement du résultat de l'analyse du combustible sec et de la proportion d'eau hygrométrique au moment donné, le poids des divers corps par kilogramme de combustible et par conséquent le pouvoir calorifique.

Conduite de l'essai. — La question la plus délicate est la détermination de la quantité de combustible brûlé. C'est cette détermination qui guide tant pour la durée, que pour l'heure du commencement et celle de la fin de l'essai; les autres considérations, telles que celles relatives à la quantité d'eau contenue dans la chaudière au commencement et à la fin de l'essai, de la température de cette eau, de la pression, sont moins importantes et l'on peut tenir compte des différences au moyen de corrections.

Quand on a affaire à une chaudière avec un foyer de petites dimensions, on peut, au commencement de l'essai, après avoir bien nettoyé la grille et constaté l'état du feu, enlever rapidement le charbon qui est sur la grille, le peser et le remettre. A la fin de l'essai, le feu étant dans les mêmes conditions qu'au commencement, on procède à une nouvelle pesée. On peut ainsi déterminer, connaissant le poids du charbon employé, la quantité de charbon réellement brûlé.

Quand la grille est de grandes dimensions, on ne peut naturellement procéder ainsi, et il faut s'arranger pour avoir la même quantité de charbon sur la grille au commencement et à la fin de l'essai.

On brûle en moyenne sur 1^{m^2} de grille 75^{kg} de charbon par heure; la densité du charbon, vides compris, est d'environ 0,90; une différence de 1^{cm} sur la hauteur du charbon donne une différence de 9^{kg} par mètre carré, ce qui, pour un essai de 1 heure de durée, donnerait une erreur de $\frac{9}{75} = 0,13$, soit 13 pour 100.

L'essai doit durer au moins de 8 à 10 heures, afin que l'erreur que l'on peut commettre sur l'évaluation du charbon ait relativement peu d'importance.

Il faut surtout empêcher le chauffeur spécial, qui est ordinairement intéressé à la réussite des essais par le constructeur, de mettre une grande épaisseur de charbon sur le devant de la grille; en effet,

ainsi au commencement de l'essai, il peut avoir la grille chargée à peu près uniformément, tandis qu'à la fin, sans que l'on s'en aperçoive, il peut n'y avoir presque pas de charbon à l'arrière.

Le meilleur moyen pour procéder aussi exactement que possible est le suivant : un peu avant le commencement de l'essai, on fait bien charger le feu et ringarder, et on laisse brûler jusqu'à ce qu'il reste sur la grille une couche uniforme de 4^{cm} à 8^{cm} de coke bien incandescent. On note alors soigneusement le niveau de l'eau dans la chaudière et la pression qui ne doit pas différer beaucoup de la pression normale, et l'essai commence.

Quand le temps fixé pour la durée de l'essai est à peu près écoulé, on procède de même et l'on arrête l'essai, quand on estime que la couche de coke a la même épaisseur qu'au commencement de l'essai. On note alors la pression de la vapeur et la hauteur de l'eau et l'on calcule la durée exacte de l'essai.

Pour évaluer la quantité de charbon brûlé pendant l'essai, il est bon de faire peser à l'avance une quantité de charbon supérieure à celle que l'on estime devoir être employée pendant sa durée. On place ce charbon en tas à proximité de la chaudière. Dès que l'on a fait charger la grille pour commencer l'essai, on enlève le restant de charbon employé avant l'essai, et à partir de ce moment le chauffeur doit puiser au tas pesé. On détermine ensuite par différence le charbon brûlé pendant l'essai.

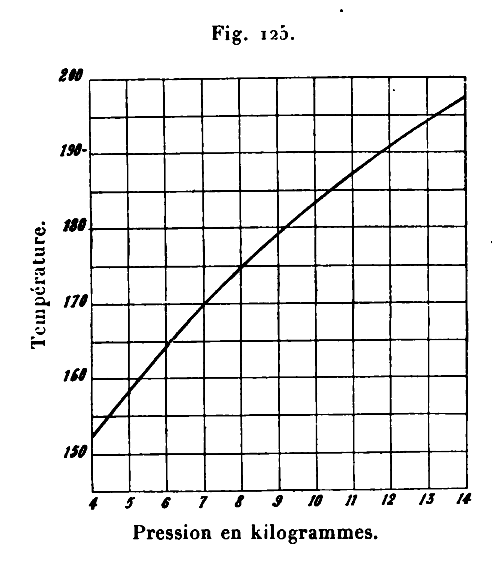
Évaluation de l'eau et du nombre de calories contenues dans la chaudière au commencement et à la fin de l'essai. — Les dessins de la chaudière permettent de déterminer le volume de l'eau contenue d'après la hauteur de l'eau dans le tube de niveau.

L'eau qui est dans le tube de niveau est plus froide que celle qui est dans la chaudière; il en résulte que le niveau de l'eau dans le tube, puisque l'eau y est plus dense, est moins élevé que dans le reste de la chaudière; on mesure sur le dessin une quantité d'eau moindre que la quantité réelle. Comme d'autre part on admet dans les calculs, comme densité de l'eau, l'unité, on commet de ce fait une erreur en sens inverse, de sorte que l'on peut admettre comme exact le poids de l'eau ainsi déterminé.

La température de l'eau contenue dans la chaudière, au commencement et à la fin de l'essai, se détermine au moyen de la Table de

Zeuner, d'après les indications du manomètre. Comme les Tables de Zeuner sont rapportées à la pression effective en kilogrammes, nous en avons déduit la courbe de la figure 125 et la Table n° 4 placée à

Fig. 125.



la fin du Volume donnant la température de la vapeur et de l'eau en fonction de la pression en kilogrammes indiquée par le manomètre (pression effective diminuée de $1^{kg},0334$).

Cette courbe et cette Table sont d'un emploi plus commode que celles que l'on trouve généralement dans les aide-mémoire.

Si V_1 est le volume de l'eau en litres contenue dans la chaudière au commencement de l'essai, T_1 la température, V_2 le volume et T_2 la température à la fin de l'essai, on a

$$C_1 - C_2 = V_1 T_1 - V_2 T_2.$$

On néglige ainsi les calories contenues dans les parois de la chaudière, mais l'erreur est de peu d'importance; on pourrait du reste en tenir compte, en admettant comme chaleur spécifique de la tôle 0,17.

Détermination de la pression moyenne et de la chaleur de la vapeur. — Pendant toute la durée de l'essai, on relève à intervalles réguliers, toutes les 10 minutes ou tous les quarts d'heure, par exemple, les indications du manomètre ainsi que celles du ther-

momètre placé dans le surchauffeur, si la chaudière est munie d'un surchauffeur.

Pour que l'essai soit valable, il ne faut pas que la pression pendant toute la durée de l'essai varie de plus de $\frac{1}{10}$ ou de $\frac{2}{10}$ de kilogramme au-dessus ou au-dessous de la valeur normale. Si la chaudière ne comporte pas de surchauffeur, on prend comme valeur moyenne de la température de la vapeur T_v, celle qui, d'après les Tables de Zeuner ou la Table n° 4, correspond à la pression moyenne; on a alors

$$C_v = 606,5 + 0,305\,T_v.$$

Si la chaudière comporte un surchauffeur, on prend comme température de la vapeur la moyenne des lectures au thermomètre.

Détermination de la quantité d'eau d'alimentation. — Le jaugeage de l'eau d'alimentation peut s'effectuer au moyen de pesées.

On peut également employer un double récipient comprenant deux vases dont on connaît la capacité, l'un se remplissant tandis que l'autre se vide dans la bâche d'alimentation.

Il faut éviter de jauger l'eau au moyen d'un compteur, ou en tenant compte du nombre de coups de piston de la ou des pompes alimentaires, car les résultats sont peu précis. On peut cependant employer ces moyens pour contrôler l'opération du jaugeage.

Pour déterminer la température de l'eau d'alimentation on place un thermomètre dans la bâche d'alimentation et l'on relève les indications de cet instrument à intervalles réguliers, par exemple en même temps que celles du manomètre. On prend ensuite comme température t_a de l'eau la moyenne des lectures.

On détermine ainsi $Q_a t_a$ quantité de chaleur apportée par l'eau.

Eau vaporisée et eau de primage. — Quand la chaudière est munie d'un surchauffeur de vapeur, la quantité de vapeur est égale à la quantité d'eau d'alimentation plus la différence entre l'eau contenue au commencement et à la fin de l'essai dans la chaudière. On a :

$$Q_v = Q_a + V_1 - V_2.$$

Quand la chaudière n'a pas de surchauffeur, il faut pouvoir évaluer



la quantité d'eau de primage ou quantité d'eau entraînée mécaniquement par la vapeur; si Q_p est le poids de cette eau, on a

$$Q_v = Q_a + V_1 - V_2 - Q_p.$$

On peut se rendre compte si l'on a une certaine quantité d'eau de primage de la manière suivante : on laisse échapper à l'air un jet de vapeur; si la vapeur est sèche ou peu humide le jet est transparent jusqu'à une certaine distance de l'orifice. La vapeur contenant plus de 3 pour 100 d'humidité forme un nuage blanc dès sa sortie de l'orifice.

Dans des essais ordinaires, on se contente de mesurer l'eau de primage en pesant la quantité d'eau recueillie aux purgeurs.

Si la chaudière alimente une machine à vapeur avec condensation par surface, il suffit de mesurer l'eau provenant de la condensation de la vapeur. On détermine ainsi directement Q_p.

Quand on fait des essais précis, on peut, pour déterminer la quantité d'eau de primage, soit employer les méthodes calorifiques dues à Hirn, soit les méthodes chimiques qui ont été employées pour la première fois à Mulhouse.

Les méthodes calorimétriques sont basées sur le fait que si t_v est la température de la vapeur, à 1^{kg} de vapeur correspondent

$$606,5 + 0,305\, t_v \text{ calories,}$$

tandis qu'à 1^{kg} d'eau entraînée mécaniquement ne correspondent que t_v calories.

Un grand nombre d'appareils, tels que ceux de MM. Brocy, Gehre, Barrus, Carpenter, etc., peuvent être employés. Quand on n'a pas d'appareil à sa disposition, on peut procéder de la manière suivante :

On dispose sur le plateau d'une bascule un tonneau en bois dur, dans lequel on met un poids Q_1 d'eau à $t°$.

On fait arriver au fond de ce tonneau, au moyen d'un tuyau en caoutchouc préalablement chauffé par de la vapeur, un poids Q' du mélange de vapeur et d'eau pris immédiatement à la sortie de la chaudière et l'on s'arrange pour que Q' soit compris entre $\frac{Q_1}{10}$ et $\frac{Q_1}{8}$, ce qui est facile puisque le tonneau est placé sur une bascule.

On brasse alors le mélange et l'on détermine sa température t_a.

Le nombre de calories contenues dans le mélange de vapeur et d'eau entraînée est :

$$(606,5 + 0,305\,t_v)x + yt_v,$$

x étant le poids de la vapeur et y celui de l'eau de primage, on a :

$$Q' = x + y.$$

La différence des calories dans le tonneau, à la fin et au commencement, est :

$$(Q_1 + Q')t_a - Q_1 t,$$

on a donc :

$$Q' t_a + Q_1(t - t_a) = (606,5 + 0,305\,t_v)x + yt_v,$$

$$y = \frac{Q'(606,5 + 0,305\,t_v - t_a) - Q_1(t_a - t)}{606,5 - 0,695\,t_v}.$$

On en déduit le rapport $a = \frac{y}{Q'}$ du poids de l'eau de primage au poids du mélange d'eau et de vapeur.

Les *méthodes chimiques* sont basées sur le fait que la vapeur d'eau n'entraîne pas les corps en dissolution dans l'eau, tandis qu'il n'en est pas de même pour l'eau de primage.

On mélange à l'eau contenue dans la chaudière, soit du sulfate de soude, soit du sel marin, et l'on fait simultanément deux prises, l'une à la chaudière, l'autre sur la conduite de vapeur. On détermine au moyen d'une analyse chimique la quantité p' des matières en dissolution dans un volume donné de l'eau de condensation et la quantité p contenue dans le même volume d'eau de la chaudière.

Le rapport de l'eau de primage au poids total de vapeur est $a = \frac{p'}{p}$.

L'essai terminé on a noté :

H, la durée en heures de l'essai ;
P, le poids du combustible brûlé (auquel correspondent Pc calories) ;
$V_1 T_1$, la quantité de calories contenues dans la chaudière au commencement de l'essai ;
$V_2 T_2$, la quantité de calories contenues dans la chaudière à la fin de l'essai ;
$Q_a t_a$, la quantité de calories apportées par l'eau d'alimentation ;
$Q_a + V_1 - V_2$ est la quantité d'eau vaporisée ;
Q_p, la quantité d'eau de primage.

Q_p a été déterminé directement, ou bien l'on a :

$$Q_p = \alpha(Q_a + V_1 - V_2).$$

Le poids de la vapeur sèche est

$$Q_v = Q_a + V_1 - V_2 - Q_p,$$

Le nombre de calories utilisées est :

$$Q_v(606,5 + 0,305\,T_v).$$

Le nombre de calories fournies à la chaudière est :

$$Pc + V_1 T_1 - V_2 T_2 + Q_a t_a.$$

Le rendement calorifique est :

$$\frac{Q_v(606,5 + 0,305\,T_v)}{Pc + V_1 T_1 - V_2 T_2 + Q_a t_a}.$$

P kilogrammes de charbon ont fourni à la chaudière :

$$Q_v(606,5 + 0,305\,T_v) + Q_p T_v - V_1 T_1 + V_2 T_2 - Q_a T_a.$$

On pourra en déduire le nombre de calories c_1 fournies à la chaudière par kilogramme de charbon.

Pour obtenir 1^{kg} de vapeur sèche à la température T'_v correspondant à la pression normale de la vapeur (qui peut différer légèrement de T_v), l'eau d'alimentation étant à 0°, il faut fournir à la chaudière :

$$606,5 + 0,305\,T'_v + \frac{Q_p}{Q_v} T'_v = C' \text{ calories},$$

il faudra donc $\frac{C'}{c_1}$ kilogrammes de charbon.

1^{kg} de charbon fournira $\frac{c_1}{C'}$ kilogrammes de vapeur sèche, l'eau d'alimentation étant à 0°.

Il est très intéressant de déterminer pendant l'essai le pour 100 de cendres et de mâchefer du charbon; il suffit pour cela de bien nettoyer le cendrier au commencement de l'essai et de peser les cendres et les mâchefers retirés pendant la durée de l'essai, après les avoir fait au besoin sécher.

Il est également bon de déterminer la quantité de bois et de charbon que l'on doit employer pour amener la chaudière froide (pression 0) à la pression normale, ainsi que la durée de cette opération.

Les résultats obtenus comme consommation de charbon dans des essais de réception sont à considérer comme des minima ; en effet, les fournisseurs des chaudières emploient alors des chauffeurs spéciaux intéressés à la réception qui apportent une grande attention à la conduite du feu et prennent toutes les précautions nécessaires. Comme les essais sont de durée relativement courte, ces chauffeurs peuvent apporter une attention et faire un travail soutenus, de sorte qu'eux-mêmes dans la pratique courante arriveraient à une consommation plus grande que pendant l'essai ; des chauffeurs ordinaires, arriveront donc *a fortiori*, à une consommation plus forte que celle constatée pendant les essais. La différence peut atteindre jusqu'à 20 et même 30 pour 100 suivant le plus ou moins d'habileté des chauffeurs.

2° *Essais de consommation d'un moteur à vapeur.*

Les essais de consommation de vapeur se font ordinairement en même temps que l'essai de la ou des chaudières.

Il faut avoir soin, pendant les essais, de boucher soigneusement toutes les conduites autres que celles qui font communiquer directement le groupe de chaudières avec le moteur.

On procède à l'essai en chargeant, soit le frein, soit la génératrice, à la valeur voulue et en maintenant cette charge aussi constante que possible, pendant toute la durée de l'essai.

On relève tous les quarts d'heure ou toutes les cinq minutes les diagrammes de la machine, ainsi que le t/m. et la puissance aux freins ou aux bornes de la génératrice. On peut également installer sur la machine un compteur totalisateur des tours et relever les indications de cet appareil à intervalles réguliers.

Au moyen des diagrammes on détermine la puissance moyenne indiquée ; connaissant aussi la puissance moyenne utile et le poids de l'eau transformée en vapeur (eau d'alimentation moins eau de primage), ainsi que le poids du combustible brûlé, on peut en déduire la dépense en vapeur et en charbon par k. w. h. indiquée et par k. w. h. utile.

Il est bon de faire un essai au maximum de charge indiqué au marché, pendant la durée fixée par ce marché, et d'examiner si la conduite du feu et celle de la machine est aisée, s'il n'y a pas d'échauffements anormaux, etc.

Quand on connaît la consommation du moteur à une charge déterminée, on peut procéder de deux manières, pour avoir la consommation approximative à une charge quelconque.

1° *Déterminer la consommation de vapeur, le moteur ou le groupe électrogène fonctionnant à vide.* — Cet essai peut être de faible durée, une ou deux heures; on n'a qu'à jauger l'eau d'alimentation et à déterminer la proportion d'eau de primage; on peut, du reste, admettre que cette proportion est la même que celle trouvée lors de l'essai de la chaudière.

Connaissant la consommation V_0 de vapeur à vide et la consommation V_c à une charge de W k. w., on aura approximativement la consommation à W_1 k. w. par la relation suivante

$$V_0 + W_1 \frac{V_c - V_0}{W}.$$

Connaissant le rendement calorifique de la chaudière ou le nombre de calories qui lui sont fournies par kilogramme de charbon, ainsi que la proportion d'eau du primage, on pourra déterminer approximativement la consommation de charbon aux diverses charges.

2° On peut également *se servir des diagrammes.*

On prend les diagrammes moyens relevés lors de l'essai de consommation sur chacun des côtés du cylindre d'admission.

Avec chacun de ces diagrammes on procède de la manière suivante : on trace une ordonnée presque à l'extrémité de la course, un peu avant que l'avance à l'échappement ne commence à un endroit où la courbe est bien régulière, de manière à pouvoir tenir compte autant que possible de la vaporisation de l'eau qui avait été condensée sur les parois.

A l'ordonnée choisie correspond une pression p en kilogrammes de la vapeur (déterminée en connaissant l'échelle du ressort de l'indicateur) et les Tables de Zeuner permettent de déterminer le poids du mètre cube de vapeur à cette pression.

En construisant très exactement les courbes représentant les poids du mètre cube de vapeur, en fonction de la pression p (dans les Tables de Zeuner les pressions correspondantes sont $p + 1,0334$),

nous avons constaté que le poids de vapeur par mètre cube est donné à 10^g près :

Pour p compris entre 0^{kg} et 3^{kg}, par la relation $j = 0{,}52p + 0{,}60$ et pour des pressions comprises entre 3^{kg} et 6^{kg} par la relation $j = 0{,}51\,P + 0{,}63$. On peut donc employer ces relations pour déterminer j.

Le volume d'une cylindrée est V et celui des espaces morts KV. KV se détermine, soit directement au moyen des dessins de la machine, soit en remplissant d'huile les espaces morts et en jaugeant cette dernière (K varie de 0,02 pour une machine à soupapes, à 0,10 et même 0,15 pour une machine ordinaire).

Le volume de la vapeur à la pression p correspondant à l'ordonnée choisie se détermine en cherchant le rapport a entre la portion de course jusqu'à cette ordonnée et la course entière. On a comme volume :

$$(a + K)V$$

et le poids de vapeur est :

$$(a + K)Vj = V_1 j.$$

On procède de même pour l'autre côté du cylindre et l'on trouve :

$$V'_1 j'.$$

Le poids de vapeur par tour de la manivelle est :

$$V_1 j + V'_1 j',$$

et si N est le t/m., le poids par heure est :

$$P'_v = 60N(V_1 j + V'_1 j').$$

Le poids de vapeur réellement dépensé d'après les résultats de l'essai de consommation étant Pv, la différence provenant des diverses pertes est :

$$Pp = Pv - P'v.$$

On peut admettre que cette perte est sensiblement constante ; on aura donc la consommation de vapeur, à une charge quelconque de la machine, en calculant le poids théorique par heure d'après les diagrammes, ainsi qu'il est indiqué ci-dessus, et en y ajoutant Pp.

Les résultats obtenus par cette méthode sont moins exacts que ceux obtenus en considérant la consommation à vide.

3° Consommation d'un moteur a gaz ou d'un groupe électrogène, moteur a gaz et dynamo.

Le gaz nécessaire au fonctionnement du moteur peut être emprunté à une canalisation de gaz de ville, et alors on doit déterminer le volume dépensé à diverses charges, ou bien il peut être fabriqué dans un gazogène spécial et alors il faut déterminer le poids de combustible (charbon, bois, etc.) brûlé.

Si le gaz est emprunté à une conduite générale, la quantité de gaz est déterminée au moyen d'un compteur.

La Compagnie Anonyme Continentale pour la fabrication de compteurs à gaz construit des compteurs dits *d'expérience,* très commodes pour les essais ; ceux-ci diffèrent des compteurs ordinaires, surtout par la disposition des aiguilles. Dans ce type de compteur, une grande aiguille permet de compter la consommation par minute, ce qui rend la vérification des essais très rapide.

On doit d'abord s'assurer si la canalisation entre le moteur et le compteur n'a pas de pertes ; ceci a lieu en vérifiant si le compteur marche pendant que le moteur ne fonctionne pas.

Pour étalonner le compteur, le moyen le plus simple est d'employer la méthode indiquée par M. Hirsch. On met le compteur en relation avec la partie supérieure d'un réservoir fermé et bien étanche, rempli d'eau, par exemple une chaudière, et l'on fait couler l'eau du réservoir par un robinet. Le compteur doit marquer exactement le nombre de litres d'eau enlevés du réservoir.

Si l'on veut un étalonnement plus exact, on doit employer un gazomètre de précision.

Un essai de consommation doit durer au moins une heure, toutes les cinq ou dix minutes on relève soigneusement la pression barométrique, la température au compteur, le t/m. du moteur (au besoin le nombre d'explosions), les diagrammes, la puissance au frein ou aux bornes de la génératrice (que l'on maintient aussi constante que possible).

La consommation est donnée par la différence entre le chiffre du compteur à la fin et au commencement de l'essai ; les relevés intermédiaires permettant de contrôler si la consommation a été bien régulière.

On détermine la puissance indiquée moyenne d'après les dia-

grammes et le t/m. ou le nombre d'explosions, et l'on calcule le nombre de k. w. h. indiqués.

On détermine également le nombre de k. w. h. utiles en prenant la puissance moyenne au frein ou aux bornes de la génératrice.

On peut ainsi déterminer le volume du gaz en litres (ordinairement à la pression et à la température moyenne) dépensé par k. w. h. indiqué et par k. w. h. utile.

Quand on établit un marché pour la fourniture d'un moteur à gaz, il faut, pour éviter toute contestation, bien définir le pouvoir calorifique du gaz à employer, et toujours indiquer que le volume sera ramené à 0° et à la pression normale de $0^{mm},760$ de mercure.

Si p_a est la pression atmosphérique moyenne constatée pendant l'essai (en millimètres de mercure), t la température moyenne, V le volume indiqué par le compteur, après correction, le volume V_0 à la température 0° et à la pression 760 est :

$$V_0 = V \frac{p_a}{760} \frac{273}{273 + t}.$$

Le pouvoir calorifique du gaz se détermine au moyen de la bombe calorimétrique; il est, pour le gaz de ville, en moyenne de $5\,250^{cal}$ par mètre cube.

Cependant il y a de grandes différences entre les gaz des différentes villes, ainsi qu'il résulte d'essais entrepris par M. Aimé Witz ([1]).

Pendant l'essai, on doit déterminer la consommation d'eau nécessaire au refroidissement, soit par jaugeage direct, en recueillant l'eau dans une bâche graduée pendant un certain nombre de minutes, soit au moyen d'un compteur. Le débit de l'eau doit être réglé de manière qu'elle ait une température de 65° à 70° à la sortie du moteur.

Si l'on a déterminé la consommation par heure V_0 du moteur à vide (ou du groupe électrogène, la dynamo non excitée) et si l'on connaît la consommation V_1 pour une charge (aussi élevée que possible) donnée W de la dynamo (ou du frein), la consommation V pour une charge W est donnée approximativement par la relation

$$V - V_0 + W \frac{V_1 - V_0}{W_1}.$$

Si le gaz nécessaire à la consommation du moteur est fourni par un

([1]) *Voir* Aimé Witz, *Traité des moteurs à gaz.*

gazogène spécial, il faut déterminer la quantité de combustible brûlé. Pour cela, comme dans le cas d'une machine à vapeur, il faut que l'essai soit de longue durée.

L'essai pourra commencer par exemple au moment où la trémie du gazogène sera complètement chargée, et on le terminera lors d'une autre chargée de la trémie, en tenant compte du combustible chargé dans l'intervalle et de celui de la dernière charge.

Dans le cas de moteurs utilisant le gaz des hauts fourneaux, qui commencent à se répandre de plus en plus, le gaz consommé pendant un certain temps peut être mesuré en desservant pendant ce temps le moteur par un gazomètre à cloche gradué.

4° Essais des groupes électrogènes avec moteurs hydrauliques.

Lors des essais on doit principalement se rendre compte si le moteur peut donner la puissance maximum garantie, si le t/m. est bien constant et si lorsque l'on décharge brusquement la génératrice le régulateur du moteur hydraulique fonctionne de manière à éviter tout emballement.

On a parfois à déterminer le rendement du moteur hydraulique et celui du groupe électrogène.

La puissance utile du moteur peut, dans certains cas, être mesurée directement au frein; si on ne le peut, son rendement se déduit de celui du groupe, connaissant le rendement de la génératrice, mesuré par une des méthodes d'estimation des pertes.

Lors des essais du transport d'énergie de Lauffen à l'exposition de Francfort en 1891, on a déterminé le rendement de la transmission à partir de l'arbre des génératrices, en établissant le rendement des turbines d'après des essais au frein d'absorption (1) (système Brauer). Une série d'essais au frein a permis d'établir des tableaux et des courbes donnant la puissance sur l'arbre commandé par chacune des turbines en fonction des hauteurs de l'eau en amont et en aval, et du nombre d'orifices des turbines ouverts.

Détermination de la puissance hydraulique.

Si D est le débit en litres par seconde et H la hauteur de chute en

(1) *Offizieller Bericht über die internationale elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt A. M.*, 1891.

mètres (dont il faut déduire au besoin la perte de charge dans les conduites), la puissance de la chute est de DH, k. g. m.

Il faut donc pour déterminer la puissance de la chute mesurer D et H.

La mesure de H peut se faire avec toute la précision désirable par un nivellement.

La détermination du débit D est beaucoup plus délicate, et la méthode à employer varie avec l'importance du débit et la nature du cours d'eau.

On peut procéder à la mesure :

1° En mesurant le temps nécessaire pour qu'il s'écoule une quantité déterminée d'eau, c'est-à-dire en employant des récipients jaugés;

2° En provoquant l'écoulement dans des conditions données;

3° En déterminant la section et la vitesse moyenne de l'eau.

1° *Emploi des récipients jaugés.*

L'emploi des compteurs d'eau n'est pas à recommander, car ces appareils donnent en général des indications trop peu précises.

La méthode d'emploi de récipients jaugés ne peut guère s'employer que pour des débits très faibles, la cause d'erreur étant la détermination exacte de la durée du remplissage.

Si l'on suppose par exemple que l'on ait à sa disposition un récipient de 1^{m^3}, il sera difficile de déterminer le temps de remplissage, à plus d'une demi-seconde près, de sorte que, pour avoir une erreur ne dépassant pas 1 pour 100, il faut que la durée du remplissage atteigne au moins 50 secondes. Le débit ne devra donc pas dépasser $\frac{1000}{50} = 20$ litres à la seconde.

Cependant, quand on peut fractionner le débit en portions absolument égales, on peut arriver à jauger par cette méthode un débit assez important. Un exemple est fourni par le compteur installé à l'usine de Luncey, par M. Bergès, pour jauger l'eau, utilisée pour la commande des turbines du tramway électrique de Grenoble à Chapareillan.

L'eau provenant des turbines arrive à la partie inférieure d'un tube cylindrique vertical. Sur le pourtour de ce cylindre sont aménagées 80 ouvertures rectangulaires de mêmes dimensions et placées à la même hauteur.

On recueille l'eau s'échappant d'une des ouvertures et on la dirige vers un réservoir gradué.

Ce principe pourrait être appliqué en procédant à plusieurs subdivisions, mais il faut bien veiller à ce que les débits des orifices soient absolument identiques, et vérifier au besoin, en recommançant l'opération pour divers orifices.

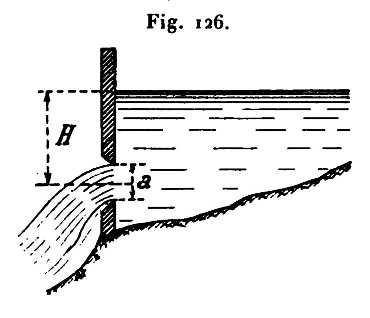
2° Méthodes par écoulement dans des conditions données.

On peut provoquer l'écoulement, soit par un orifice *en mince paroi*, soit par *déversoir*.

Orifices en mince paroi. — Pour avoir un orifice en mince paroi, il faut que l'épaisseur de la paroi soit inférieure à la moitié de la plus petite dimension de l'orifice.

En pratique on perce l'orifice rectangulaire dans une planche et l'on taille les bords en biseau vers l'extérieur (*fig.* 126).

Fig. 126.



Si H est la hauteur du niveau de l'eau au-dessus du milieu de l'orifice, s'il n'y avait pas contraction de la veine liquide, le débit en litres serait :

$$D = 1000\Omega\sqrt{2gH} = 4430\Omega\sqrt{H},$$

Ω étant la section de l'orifice en m^2, et H étant exprimé en m.

Il y a toujours contraction de la veine liquide, et, si l'on désigne par m le rapport de la section contractée à la section de l'orifice, on a :

$$D = 4430\, m.\Omega\sqrt{H}.$$

La valeur de m a été déterminée par MM. Lesbros et Poncelet,

dans divers cas. La valeur dépend des dimensions de l'orifice et de la hauteur d'eau au-dessus de la partie supérieure de l'orifice $\left(h = H - \frac{a}{2}\right)$.

Les diverses valeurs de m sont données dans les Tables de Lesbros et Poncelet, reproduites dans l'*Aide-Mémoire* de Claudel.

Dans chaque cas, la valeur de m augmente d'abord avec la charge d'eau au-dessus de l'orifice (h), passe par un maximum, puis diminue lentement et enfin, à partir d'une charge supérieure à 10 fois la hauteur de l'orifice ($h > 10a$), m reste constant.

La valeur de m varie de 0,572 à 0,695.

On peut prendre comme moyenne pour des orifices de $0^m,15$ à $0^m,20$ de hauteur, $m = 0,60$.

On augmente le débit d'un orifice en mince paroi en supprimant la contraction en le munissant de fausses parois.

On dispose à l'intérieur du récipient, dans lequel est aménagé l'orifice, une fausse paroi placée au bord de l'orifice, perpendiculairement à la paroi, ce qui supprime la concentration de la veine liquide du côté où elle est installée.

Le mieux est de supprimer la concentration sur les bords latéraux de l'orifice, au moyen de deux fausses parois verticales.

On peut alors, pour la détermination de m, employer la Table suivante, dressée par Lesbros, en interpolant au besoin :

Charge en m sur le sommet de l'orifice.	Valeur du coefficient de contraction m pour des hauteurs d'orifice.		
	$0^m,20$.	$0^m,05$.	$0^m,01$.
0,02	»	0,655	0,715
0,03	»	0,653	0,706
0,04	0,649	0,651	0,699
0,06	0,647	0,648	0,691
0,10	0,645	0,645	0,683
0,20	0,661	0,642	0,675
0,30	0,639	0,642	0,671
0,40	0,639	0,641	0,688
0,60	0,638	0,639	0,665
1,00	0,638	0,634	0,658
1,50	0,637	0,627	0,651
2,00	0,636	0,621	0,647
3,00	0,634	0,614	0,644

Par exemple, pour un orifice de $0^m,20$ de hauteur, $0^m,50$ de largeur, avec une charge de 1^m au-dessus de l'orifice, avec fausses parois verticales, on a :

$$h = 1 \text{ m.}, \quad H = 1,10 \text{ m.}, \quad \Omega = 0,20 \times 0,50 = 0,10 \text{ m}^2, \quad m = 0,638,$$

$$D = 4430 \times 0,638 \times 0,10 \times \sqrt{1,10} = 296,48 \text{ litres.}$$

La détermination de H est assez délicate. On peut adapter à l'extérieur un tube de niveau, gradué, mais il faut alors que l'orifice du tube soit disposé à l'intérieur du récipient à un endroit où il n'y a pas de remous. On peut également disposer une règle graduée verticale, à proximité de la surface de l'eau, là où elle est bien tranquille, et disposer sur cette règle une coulisse à laquelle est fixé verticalement un style de longueur donnée. On déplace le style jusqu'à ce que sa pointe touche l'eau, ce que l'on reconnaît à son image dans l'eau. On mesure la hauteur entre un point donné de la règle (munie d'un vernier) et l'orifice, et l'on peut ainsi déterminer h et par conséquent H.

On ne peut guère mesurer H à plus de 2^{mm} près; il est donc avantageux, au point de vue de l'erreur relative, de prendre la charge au-dessus de l'orifice aussi grande que possible.

On a souvent à sa disposition des vannes. On peut alors mesurer approximativement le débit en soulevant plus ou moins ces dernières, de manière à obtenir un écoulement en déversoir. Quand la vanne est noyée, on prend pour H la différence de niveau entre les niveaux de l'eau en amont et en aval.

Quand le seuil de la vanne est très rapproché du radier, ce qui a lieu pour les vannes d'écluses, on peut prendre $m = 0,625$.

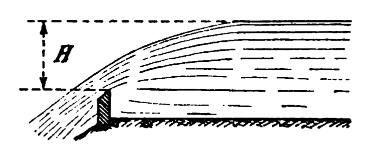
Pour des vannes d'usines débouchant à l'air libre et dont le seuil est établi au-dessus du radier, on peut employer, pour déterminer la valeur de m, la table suivante dressée par Lesbros :

Charge sur le sommet de l'orifice	Levée de la vanne.			
en m.	$0^m,40$.	$0^m,20$.	$0^m,05$.	$0^m,03$.
0,20	0,648	0,671	0,691	0,707
0,50	0,653	0,678	0,696	0,711
1,00	0,636	0,676	0,695	0,706
1,50	0,624	0,675	0,694	0,700
2,00	0,617	0,674	0,694	0,697
3,00	0,607	0,674	0,692	0,693

Lesbros a également dressé des tables pour le cas de vannes inclinées, qui sont du reste peu employées dans la pratique.

Jeaugeages par déversoirs. — Pour obtenir un déversoir en mince paroi, on place sur la crête du barrage une planche dont l'arête supérieure est taillée en biseau vers l'extérieur (*fig.* 127).

Fig. 127.



Si L est la largeur en mètres, H la hauteur du niveau de l'eau, en amont (à quelques mètres en avant du barrage) au-dessus de la crête du barrage, et m le coefficient de concentration, on a :

$$D = 1000\, m . LH\sqrt{2gH} = 4430\, m . LH\sqrt{H}.$$

En prenant pour m la valeur moyenne 0,42, on a :

$$D = 1800 LH\sqrt{H}.$$

Avec une largeur d'écoulement de 1^m et $H = 0,70$ on a $D = 1058^{lit}$.

La relation donnée ci-dessus n'est qu'approximative, la valeur de m dépendant des conditions de l'essai, de la hauteur de la crête au-dessus du fond du canal, de la largeur du déversoir, de la forme de la nappe d'eau.

Poncelet et Lesbros, pour des déversoirs en mince paroi avec L compris entre 0,20 et 0,60 et $H < 0,30$, ont trouvé $m = 0,375$.

Boileau, après avoir supprimé la contraction latérale en employant de fausses parois verticales, a trouvé $m = 0,429$. Hirn a trouvé à peu près le même coefficient pour des seuils très larges.

M. Bazin a procédé à des essais très étendus sur des déversoirs en mince paroi de $1^m,50$ à 2^m de largeur et a publié des Tables très complètes des valeurs de m [1]. Il a divisé les déversoirs en sept classes suivant la forme du jet et du remous à l'aval.

(1) Bazin, *Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir.*

Diverses déterminations ont été également faites avec des déversoirs à parois plus ou moins épaisses. Graeff a trouvé pour le barrage de Furens, avec parois de $0^{m},15$ d'épaisseur, $m = 0,45$.

Dans tous les cas, si l'on veut obtenir des résultats précis, il faut se reporter aux résultats des essais des expérimentateurs indiqués ci-dessus et se placer absolument dans les mêmes conditions.

La détermination de H peut se faire en employant la méthode de la règle graduée et de la pointe; pour avoir le niveau amont, il faut se placer à quelques mètres en amont du barrage, à un endroit où l'eau est bien tranquille. Il y a avantage au point de vue de l'erreur que l'on peut commettre à prendre H aussi grand que possible, car on ne peut guère déterminer sa valeur à plus de un quart de centimètre près. Dans ces conditions, pour $H = 0,05$, on peut avoir une erreur atteignant 7 pour 100, tandis qu'avec $H = 0,75$ l'erreur maximum ne dépasse pas 0,5 pour 100.

3° *Mesure de la section et de la vitesse moyenne.*

Si S est la section en m^2 et V la vitesse moyenne en m, le débit en litres est $D = 1000\,SV$.

La section se détermine en levant un profil en travers du cours d'eau; la vitesse peut être mesurée soit au moyen de *flotteurs*, soit au moyen de l'*hydromètre*.

Jaugeage par flotteurs. — On peut employer des flotteurs de surface constitués par des disques de bois, mais il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas de vent, car il a une grande influence.

On peut admettre que la vitesse moyenne dans une section est les $\frac{80}{100}$ de la vitesse du flotteur de surface.

Le mieux est d'employer comme flotteurs des bâtons bien lestes, dont la partie supérieure est munie d'un petit drapeau en papier, par exemple, pour les rendre bien visibles. En donnant à ces flotteurs une hauteur comprise entre les $\frac{5}{6}$ et les $\frac{9}{10}$ de la profondeur de la section du cours d'eau, on peut admettre qu'ils sont animés de la vitesse moyenne de l'eau dans la section.

Il faut mesurer la vitesse du flotteur à une certaine distance du point d'où on l'a lancé, afin d'être bien sûr qu'il a pris la vitesse moyenne de l'eau.

Pour procéder à un jaugeage d'un cours d'eau de moyenne importance on doit procéder comme l'a indiqué M. Rieter.

On choisit un emplacement où sur 120^m au moins le cours d'eau soit bien en ligne droite, et l'on relève deux profils en travers distants de 50^m l'un de l'autre. Les profils relevés doivent être semblables (ils sont ordinairement identiques dans le cas du canal de décharge d'une usine).

On tend en travers du cours d'eau, normalement à sa direction, trois fils de fer, l'un à 25^m, en amont du premier profil en travers, le second au milieu de la distance entre les deux profils et le troisième à 25^m en aval du second profil. A 15^m en amont du premier fil de fer, on établit une passerelle d'où l'on jette les flotteurs de manière qu'ils suivent des chemins correspondant aux milieux des diverses sections des profils en travers.

On mesure la vitesse de chaque flotteur, entre deux fils de fer correspondant à l'un et à l'autre profil, et l'on multiplie la vitesse moyenne par la surface de la section. On fait alors la somme des débits des sections pour chaque profil en travers, et l'on prend pour débit du cours d'eau la moyenne.

Jaugeage au moyen d'hydromètres. — On relève un profil en travers du cours d'eau, on le partage en sections et l'on relève sur la verticale du milieu de chaque section, au moyen d'hydromètres, la vitesse en plusieurs points (trois, par exemple, au milieu, à 30^{cm} ou 40^{cm} au-dessous du niveau de l'eau, puis, à la même distance du fond, et l'on prend comme vitesse moyenne dans la section la moyenne des vitesses relevées.

Le point de vitesse maximum n'est pas situé sur l'ordonnée de plus grande profondeur du cours d'eau. Sur une même verticale, le point de vitesse maximum se trouve à $0^m,50$ ou 1^m au-dessous du niveau, et cette profondeur dépend du vent. On peut estimer que la vitesse moyenne dans une section est les $\frac{67}{100}$ de la vitesse maximum.

Comme hydromètre on peut employer le tube Pitot avec la modification Darcy, ou l'hydrotachymètre de M. Rieter [1], dans lequel la

---

[1] *Annales des Ponts et Chaussées* de juillet 1892.

profondeur d'immersion peut être mesurée au moyen des indications d'un manomètre.

On emploie également souvent le moulinet de Woltmann, qui doit être étalonné au préalable.

On a également proposé divers autres appareils, tels que le tachymètre de Bruning, le pendule hydrométrique, etc., mais ils ne sont pas entrés dans la pratique.

Avec un peu d'habitude on peut se rendre compte approximativement de la vitesse superficielle d'un cours d'eau en examinant la forme des rides à la surface, par exemple autour d'une tige de plante émergeant de l'eau. M. Rieter a constaté que la formation de rides commence quand la vitesse de l'eau est de $0^m,20$ par seconde.

CHAPITRE VI.

COMPLÉMENT.

Depuis la rédaction des conférences, diverses méthodes et procédés ont été indiqués, qui permettent de faire ou plus exactement ou plus commodément les essais; nous les indiquons ci-dessous.

1° RHÉOSTAT POUR HAUTES TENSIONS.

Dans le numéro de mars 1903 de *La Houille blanche* est donnée la description suivante d'un rhéostat pour hautes tensions, dont l'emploi paraît être très commode.

Cet appareil avec résistance constituée par de l'eau pure, est constitué de la manière suivante :

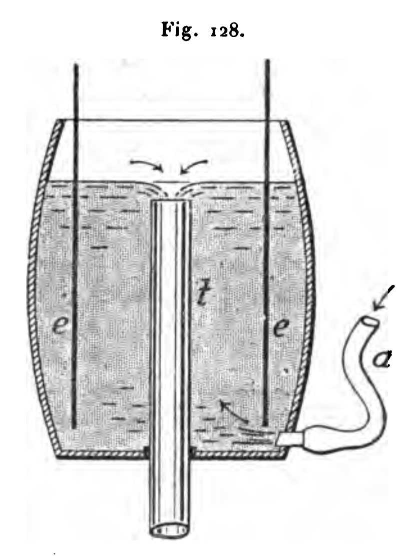
Un tonneau ordinaire (*fig.* 128) est placé sur un plancher soigneusement isolé par des isolateurs à triple cloche. Verticalement sont placées deux électrodes rectangulaires *e* en cuivre, reliées aux fils de ligne isolés avec soin. L'arrivée de l'eau se fait par un tuyau de caoutchouc descendant jusqu'au fond du tonneau ou relié à une ouverture pratiquée vers le bas. Un tube *t* en matière isolante traverse le fond et s'élève suivant l'axe du tonneau sur toute sa hauteur. Ce tube servant de déversoir peut se mouvoir verticalement. De cette façon on règle le niveau de l'eau dans le tonneau et par conséquent la résistance du rhéostat, sans avoir à toucher aux conducteurs, ce qui évite tout danger. Le débit de l'eau est réglé de telle manière que la température du rhéostat ne s'élève pas d'une façon anormale.

Le tube de réglage se manœuvre commodément par le haut à l'aide d'une corde et d'un petit moufle. On a soin d'intercaler sur la corde un isolateur à haute tension.

L'appareil étant ainsi disposé, on procède au réglage de la manière suivante :

On place les deux électrodes à une certaine distance l'une de l'autre et l'on relève le tube déversoir de façon à diminuer progressivement

Fig. 128.



la résistance, en partant de la résistance infinie, jusqu'à ce que la dynamo soit en charge. Si la course du tube n'est pas suffisante, c'est que les électrodes sont trop éloignées. Il faut arrêter, les rapprocher et recommencer à relever le tube déversoir jusqu'à ce que la résistance voulue soit atteinte. Il y a intérêt à admettre une densité de courant assez faible à la surface des électrodes.

Ce rhéostat ne présente pas de self-induction, avantage précieux pour les essais avec du courant alternatif.

Pour les essais avec des courants triphasés, il faut monter trois rhéostats semblables et rendre solidaires les tuyaux de réglage, de façon à répartir également la charge sur les trois phases.

Trois électrodes réunies entre elles constituent le point neutre et les trois autres les trois bornes du rhéostat. La même canalisation d'eau, sur laquelle on branche trois tubes de caoutchouc, alimente le rhéostat.

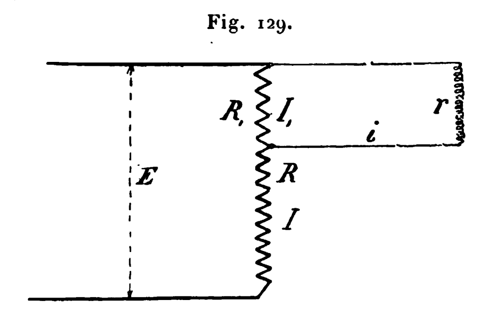
Plusieurs rhéostats de ce genre ont fonctionné d'une manière satisfaisante sous 5000, 7000 et même 12000 volts.

2° DISPOSITIF DE M. KINTZBRUNNER POUR LE TRACÉ DES CARACTÉRISTIQUES A VIDE DES DYNAMOS.

Lors du tracé de la caractéristique à vide d'une dynamo (p. 66 et 119) on est obligé de faire varier l'intensité du courant d'excitation dans de grandes limites, et l'on n'a pas toujours des rhéostats permettant de le faire commodément et régulièrement quand on ne dispose que d'une tension fixe.

M. Kintzbrunner, dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 26 mars 1903, a indiqué un dispositif très simple permettant d'obtenir des valeurs croissant progressivement pour l'intensité du courant d'excitation. Une résistance fixe est intercalée dans le circuit à tension constante, et le courant d'excitation (*fig.* 129) est dérivé

Fig. 129.



entre l'une des extrémités de cette résistance et l'un quelconque de ses points; on peut ainsi obtenir pour l'excitation un courant dont l'intensité varie de o à un maximum en déplaçant le point choisi sur la résistance.

Si E est la tension dont on dispose, r la résistance de l'enroulement inducteur de la machine à essayer, R la résistance fixe intercalée, R_1 la portion de la résistance entre les extrémités de laquelle le courant d'excitation est dérivé, i l'intensité du courant d'excitation, I_1 l'intensité du courant dans la portion R_1 de la résistance, I celle dans le restant de la résistance fixe, on a

$$I = I_1 + i, \qquad R_1 I_1 + (R - R_1) I = E,$$
$$R_1 I_1 = ri.$$

On tire de ces relations :

$$i = \frac{R_1}{RR_1 + Rr - R_1^2} E,$$

$$I = \frac{R_1 + r}{RR_1 + Rr - R_1^2} E,$$

$$I_1 = \frac{r}{RR_1 + Rr - R_1^2} E.$$

R_1 peut varier de o à R.

Quand R_1 passe de o à R, i augmente et passe de o à $\frac{E}{r}$, I augmente et passe de $\frac{E}{R}$ à $E\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right)$ qui est donc sa valeur maximum.

I_1 varie de $\frac{E}{R}$ à $\frac{E}{R + \frac{R^2}{2r}}$, c'est-à-dire diminue quand R_1 varie de o à $\frac{R}{2}$, puis sa valeur augmente jusqu'à $\frac{E}{R}$ quand R_1 passe de $\frac{R}{2}$ à R.

L'intensité maximum dans les diverses parties de la résistance fixe est donc variable, et l'on devra au besoin faire varier la section des diverses portions de cette résistance, afin qu'elles puissent supporter sans danger le courant d'intensité maximum; les relations données ci-dessus permettront alors de calculer l'intensité maximum dans les diverses parties, et de déterminer les sections.

3° MÉTHODE DE M. DETTMAR POUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONTACT DES BALAIS.

L'emploi de la méthode de M. Arnold (p. 50) exige que l'on isole au moins un porte-balais, et il peut facilement en résulter des différences, dans les contacts, après cette modification ; d'autre part, dans les autres méthodes (p. 51), l'aiguille du v. m. ne reste pas fixe et la lecture de la chute de potentiel exacte est difficile.

M. Dettmar a indiqué dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 30 août 1900 une méthode permettant de mesurer la résistance, sans avoir à toucher aux balais quand la dynamo a plus de deux rangées de balais.

On supprime la liaison directe entre deux des rangées de même polarité, et l'on fixe aux tiges deux câbles de grande section reliés par un interrupteur. L'interrupteur étant fermé, on procède à l'essai de la

dynamo, puis ensuite on ouvre cet interrupteur, et l'on relie l'un des câbles à l'une des extrémités d'un circuit et l'autre à l'autre extrémité puis on fait circuler un courant, la dynamo n'étant pas excitée, mais tournant au t/m. normal.

On fait varier l'intensité du courant et l'on relève chaque fois la chute de tension entre les balais.

Ordinairement, les lames du collecteur placées sous les balais de même polarité sont ou reliées directement entre elles (système Mordey), ou reliées par une spire, qui est mise en court-circuit et se trouve dans la région neutre, de sorte que la résistance et l'influence du magnétisme rémanent sont négligeables et l'on peut admettre que la chute de tension mesurée est celle due à la résistance de contact des balais.

Naturellement on calcule l'intensité correspondante pour la dynamo. On peut reconnaître si le magnétisme rémanent a de l'influence en recommençant l'opération en envoyant le courant dans le sens contraire, et en vérifiant si l'on a la même chute.

Au besoin on peut déterminer la résistance inhérente à l'induit, en procédant au même essai au repos et en mesurant la chute de tension entre les lames du collecteur placées sous les balais.

Quand la dynamo n'a que deux rangées de balais, on ne peut employer cette méthode. Si le collecteur tourne absolument rond, la résistance de contact varie excessivement peu avec la vitesse (quoiqu'elle soit toujours différente de celle mesurée au repos) comme les essais de M. Dettmar l'ont montré. On peut alors envoyer du courant entre les deux rangées de balais de polarité différente et mesurer la chute de tension, en faisant tourner la dynamo à la main, de manière à obtenir une vitesse de 0,2 m. par seconde au moins. On n'a pas ainsi à tenir compte de l'influence du magnétisme rémanent, vu la faible vitesse. On détermine la résistance intérieure de l'induit, comme il a été indiqué, et l'on en tient compte dans le calcul.

Quand le collecteur ne tourne pas absolument rond, la résistance de contact varie avec la vitesse, ce que l'on peut vérifier en faisant tourner la dynamo plus ou moins vite à la main.

On peut alors opérer de la manière suivante : on diminue autant que possible le magnétisme rémanent en envoyant un courant démagnétisant (en sens inverse du courant d'excitation), de manière que la f. e. m. à vide soit nulle. On détermine la chute de tension, entre

les balais à diverses intensités, en faisant tourner la dynamo au t/m. normal.

On inverse ensuite le sens du courant et l'on procède aux mêmes mesures, et l'on prend la moyenne des deux relevés, afin d'éliminer toute action du magnétisme rémanent. On tient naturellement compte de l'influence de la résistance intérieure de la dynamo.

4° MÉTHODE GRAPHIQUE POUR LA SÉPARATION DES PERTES PAR FROTTEMENT DES AUTRES PERTES A VIDE.

Ainsi qu'il a été indiqué à la page 93, on peut séparer les pertes par frottement des autres, en traçant la courbe de la figure 45 (p. 82), c'est-à-dire en rapportant la perte en fonction de la tension.

Afin de donner plus de précision à la méthode, M. le D[r] Max. Breslauer conseille de rapporter la perte au carré de la tension. Dans ce cas, les points de la courbe correspondant aux faibles tensions sont beaucoup plus rapprochés, de sorte que la longueur sur laquelle on doit prolonger la courbe est bien moindre et la précision plus grande.

5° DÉTERMINATION DU RENDEMENT DES TRANSFORMATEURS.

Actuellement on construit des transformateurs de très grande puissance, de sorte que l'intensité du courant dans le circuit à basse tension peut être très élevée. La section de ces enroulements est très grande et, si des précautions n'ont pas été prises, on peut avoir une perte importante par courants de Foucault dans les conducteurs.

On ne tient pas compte de cette perte, en employant la méthode des pertes séparées, telle qu'elle a été indiquée (p. 161 et suivantes) et pour y arriver on doit procéder de la manière suivante :

On met en court-circuit sur un a. m. le circuit secondaire à basse tension, en établissant des contacts aussi peu résistants que possible (*voir* p. 12). Si l'on a affaire à un transformateur triphasé, on procède comme pour le cas de l'essai en court-circuit des génératrices (p. 122); cependant, dans le cas où les axes, les trois noyaux de l'appareil ne sont pas disposés aux extrémités d'un triangle équilatéral, il vaut mieux placer trois a. m., un dans chaque phase.

On applique alors aux bornes du circuit à haute tension une d. d. p. dont on peut régler la valeur et on la fait varier jusqu'à ce que l'a. m.

indique l'intensité i_2 du courant de pleine charge, ou dans le cas de transformateur à noyaux non symétriquement disposés, comme les intensités peuvent être notablement différentes dans les trois phases, jusqu'à ce que la moyenne des indications de trois a. m. corresponde à l'intensité du courant de pleine charge. On mesure alors la d. d. p. appliquée e, l'intensité du courant primaire i_1 et la puissance w fournie à l'appareil.

On peut admettre sans erreur appréciable que cette puissance correspond aux pertes dans le cuivre du transformateur à la charge donnée. Si l'on veut opérer avec une grande exactitude, on détermine au moyen de la courbe donnant la perte à vide, en fonction de la tension aux bornes (p. 155; *fig.* 106), la perte dans le fer f à la tension $e - ri$ (mesurée géométriquement en traçant le diagramme, l'angle de décalage étant déterminé, puisqu'on connaît la puissance et les voltampères).

La perte dans le cuivre primaire pour le cas du court-circuit étant $r_1 i_1^2$, la perte dans le cuivre du secondaire à pleine charge sera :

$$w_2 = w - f - r_1 i_1^2.$$

La perte par courants de Foucault, dans les conducteurs à basse tension, est $w_2 - r_2 i_2^2$, r_2 étant la résistance ohmique de l'enroulement secondaire.

On peut ainsi déterminer l'ensemble des pertes et le rendement de l'appareil.



CHAPITRE VII.

RÈGLEMENTS DIVERS RELATIFS AUX ESSAIS DES MACHINES ET APPAREILS ÉLECTRIQUES.

Le règlement américain relatif à l'unification des génératrices, des moteurs et des transformateurs électriques (*Standardization of electric generators, motors and transformers*) a été élaboré par une Commission (¹) de l'Institut américain des Ingénieurs électriciens et a été adopté le 20 juin 1899. Il a été ensuite légèrement modifié et de nouveau soumis à l'Assemblée générale tenue à Great Barrington le 20 juin 1902. Il a été accepté par l'Institut, les grandes maisons de construction, les corporations, les journaux techniques et les instituts électrotechniques d'Amérique.

Définitions préliminaires.

Un courant direct est un courant ayant toujours la même direction.

Un courant continu est un courant direct fixe non pulsatoire.

Un courant alternatif est un courant dont les demi-périodes égales se succèdent alternativement en sens opposés.

Un courant oscillatoire est un courant dont le sens est alterné et dont l'amplitude décroît.

Les appareils électriques sont classés de la manière suivante :

1. *Les machines à commutation* comprennent un champ magnétique constant, un induit à circuit fermé et un commutateur à segments multiples connecté avec celui-ci.

Sous cette dénomination sont compris : les génératrices à courant

(¹) Les membres de cette Commission étaient M. F.-B. Crooker, président et MM. Cary, T. Hutchinson, A.-E. Kennely, John-W. Lieb, Charles-P. Steinmetz, Lewis-B. Stillwell et Elihu Thompson.

continu, les moteurs à courant continu, les survolteurs à courant continu, les moteurs générateurs, les dynamo-moteurs, les convertisseurs et les machines à arc à bobine ouverte.

Un *survolteur* est une machine mise en série dans un circuit pour faire varier son voltage, il peut être actionné par un moteur électrique ou de toute autre manière. Dans le premier cas, on a un *moteur survolteur*.

Un *moteur générateur* est un ensemble transformateur constitué par deux machines : un moteur et une génératrice couplés mécaniquement.

Un *dynamo-moteur* est un ensemble transformateur dans lequel les actions motrice et génératrice sont combinées dans un champ magnétique, avec deux induits ou avec un induit muni de deux enroulements.

Pour les convertisseurs, *voir* § 3.

. *Les machines synchrones* comprennent un champ magnétique constant et un induit recevant ou fournissant du courant alternatif en synchronisme avec le mouvement de la machine, c'est-à-dire ayant une fréquence égale au produit du nombre de paires de pôles par le nombre de tours de la machine par seconde.

3. *Les machines synchrones à commutation*. — Celles-ci comprennent : 1° les convertisseurs synchrones appelés communément *convertisseurs*, transformant le courant alternatif en continu, ou le continu en alternatif ; 2° les génératrices à double courant, c'est-à-dire des génératrices produisant à la fois du courant continu et du courant alternatif.

Un convertisseur est une machine utilisant un couple mécanique pour transformer de l'énergie électrique d'une forme en une autre.

Un convertisseur peut être :

a. Un convertisseur à courant direct transformant un courant direct en courant direct ;

b. Un convertisseur synchrone, désigné anciennement sous le nom de *convertisseur rotatif*, transformant un courant continu en courant alternatif, ou *vice-versa*.

Des convertisseurs de phases transforment un système de courant

alternatif, de fréquence donnée, en un système de courant alternatif de même fréquence, mais de phase différente.

Les *convertisseurs de fréquence* transforment un système de courant alternatif, de fréquence donnée, en un système de courant alternatif d'une fréquence différente, avec ou sans changement dans le nombre de phases.

4. *Les machines redresseuses ou génératrices à courant pulsatoire* produisent un courant de direction unique dont l'intensité varie périodiquement.

5. *Les appareils stationnaires d'induction,* c'est-à-dire les appareils stationnaires transformant l'énergie électrique d'une forme en une autre, en prenant comme intermédiaire l'énergie magnétique.

Ceux-ci comprennent :

a. Les *transformateurs* ou appareils stationnaires d'induction dans lesquels les enroulements primaire et secondaire sont isolés électriquement l'un de l'autre ;

b. Les *auto-transformateurs* également désignés sous le nom de *compensateurs,* c'est-à-dire les appareils stationnaires d'induction dans lesquels une portion de l'enroulement primaire est employée comme enroulement secondaire, ou inversement;

c. Les *régulateurs de potentiel,* ou appareils stationnaires d'induction ayant une bobine en dérivation et une bobine en série avec le circuit, disposées de telle manière que le rapport de transformation entre elles soit variable à volonté.

Ceux-ci peuvent être classés en types suivants, ou combinaisons de ces derniers :

1° Régulateurs de potentiel à compensateurs dans lesquels le nombre de tours d'une des bobines peut varier ;

2° Régulateurs de potentiel à induction, dans lesquels les positions relatives des bobines primaire et secondaire peuvent varier ;

3° Régulateurs de potentiel magnétiques dans lesquels la direction du flux magnétique, par rapport aux bobines, seule peut changer.

d. Bobines à réaction ou bobines à réactance (nommées anciennement *choking coils*), c'est-à-dire des appareils stationnaires

d'induction employés pour produire de l'impédance ou un décalage de phase.

6. *Les appareils rotatifs d'induction* sont constitués par des enroulements primaire et secondaire tournant l'un par rapport à l'autre. Ils comprennent :

a. Les moteurs d'induction ;
b. Les génératrices d'induction ;
c. Les convertisseurs de fréquence (*frequency converters*) ;
d. Les convertisseurs rotatifs de phase.

RENDEMENT.

1° Le *rendement* d'un appareil est le rapport de la puissance nette qui lui est fournie à la puissance qu'il restitue ([1]).

2° Le rendement de tous les appareils, à l'exception de ceux qui sont destinés à un service intermittent, doit être mesuré ou ramené à la température que l'appareil prend lors d'un fonctionnement continu, à pleine charge, la température de la salle étant supposée de 25° C.

Pour les appareils destinés à un service intermittent, le rendement doit être mesuré à la température atteinte dans les conditions spécifiées de fonctionnement.

3° La puissance électrique doit être mesurée aux bornes de l'appareil.

4° Quand on détermine le rendement d'un appareil à courant alternatif, la puissance électrique doit être mesurée quand le courant est en phase avec la f. e. m., à moins qu'il ne soit spécifié autrement, à l'exception du cas où une différence de phase définie est inhérente à l'appareil lui-même, comme pour les moteurs d'induction, les génératrices d'induction, les convertisseurs de fréquence, etc.

5° La puissance mécanique des machines doit être mesurée à la poulie, à la roue dentée, au manchon d'accouplement, etc., de

---

([1]) Une exception doit être faite pour le cas des batteries d'accumulateurs ou appareils emmagasinant de l'énergie, pour lesquels le rendement doit être compris comme étant le rapport de l'énergie fournie à l'énergie restituée dans un cycle normal.



manière à ne pas tenir compte de la perte de puissance à la poulie, dans les engrenages ou au manchon, mais à comprendre le frottement des paliers et la résistance de l'air.

La valeur des frottements dans les paliers et de la résistance de l'air peut être considérée comme étant indépendante de la charge. La perte de puissance due à la courroie et à l'excédent de frottement dû à la tension de la courroie ne doit pas être comptée.

Quand cependant une machine est montée sur l'arbre du moteur qui l'actionne, de telle sorte qu'elle ne puisse plus en être séparée, les pertes par frottement des paliers et résistances de l'air qui, par définition, doivent être comprises dans les pertes de la machine lors de la détermination du rendement, ne doivent pas y être comptées, à moins que l'on ne puisse les déterminer d'une manière satisfaisante. Le frottement des balais, par contre, doit être compris.

Quand une machine est munie d'un appareil auxiliaire, une excitatrice par exemple, la puissance perdue dans l'appareil ne doit pas être comptée dans les pertes de la machine, mais bien dans celles de l'ensemble machine et appareil. On doit alors faire une différence entre le rendement de l'ensemble et celui de la machine.

Le rendement peut être déterminé en mesurant individuellement toutes les pertes, et en ajoutant leur somme à la puissance fournie par la machine pour obtenir la puissance qui lui a été transmise, ou en la soustrayant de la puissance transmise à la machine pour déterminer la puissance qu'elle fournit. Toutes les pertes doivent être mesurées ou rapportées à la température atteinte après un fonctionnement continu ou un fonctionnement dans des conditions spécifiées (*voir* §§ 26 à 35).

Afin de pouvoir bien appliquer les règles données ci-dessus aux diverses machines, celles-ci peuvent être convenablement classées de la manière suivante :

1° *Machines à commutation.*

7. Dans les machines à commutation, les pertes sont :

a. Les frottements des paliers et la résistance de l'air (*voir* § 5) ;

b. Les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le fer et dans le cuivre, y compris les connexions sur les faces de l'induit. Ces pertes doivent être déterminées avec la machine à circuit ouvert,

et une tension égale à la tension normale, $+ Ir$ pour une génératrice et $- Ir$ pour un moteur : I étant l'intensité du courant, et r la résistance intérieure de la machine. Elles doivent être mesurées à la vitesse et à la tension normales, puisqu'elles ne varient pas dans une proportion définie avec la vitesse et la tension ;

c. Les pertes dues à la résistance de l'induit $I^2 r'$, I étant l'intensité du courant dans l'induit, et r' la résistance de l'induit, sans y comprendre la résistance des balais et leur résistance de contact ;

d. Le frottement des balais sur le collecteur ;

e. La résistance de contact des balais et du collecteur. Il faut remarquer qu'avec des balais en charbon les pertes (*d*) et (*e*) sont ordinairement considérables pour le cas des machines à basse tension ;

f. L'excitation du champ. Dans le cas d'une excitation séparée, la perte de puissance dans la bobine inductrice doit être seule considérée. Dans le cas d'excitation en dérivation ou en série, la perte de puissance dans le rhéostat de champ doit être comprise dans les pertes de la machine, le rhéostat étant considéré oomme partie essentielle de la machine et non comme un appareil auxiliaire séparé.

(*b*) et (*c*) sont les pertes dans l'induit; (*d*) et (*e*), les pertes au collecteur, et (*f*) la perte pour l'excitation.

8. La différence entre le total des pertes en charge et la somme des pertes spécifiées ci-dessus doit être considérée comme les *pertes dues à la charge* (*load losses*). Elles sont généralement peu importantes dans les machines à collecteur ayant une faible distorsion de champ. Quand la distorsion du champ est grande, ce dont on s'aperçoit par la nécessité de faire varier le calage des balais entre la marche à vide et la marche à pleine charge, ou pour des variations de charge, ces pertes peuvent être considérables, et l'on doit en tenir compte. Ceci s'applique spécialement aux génératrices à intensité constante pour éclairage par arcs. Dans ce cas, le rendement peut être déterminé soit par mesure de la puissance absorbée et de la puissance restituée par la machine, soit par calcul des pertes dues à la charge, méthode indiquée dans la section II.

9. Les survolteurs doivent être considérés et traités comme les autres machines à courant continu au point de vue des pertes.

10. Dans les moteurs générateurs, dynamo-moteurs et convertisseurs, le rendement est le rapport de la puissance électrique recueillie à la puissance électrique fournie.

2° *Machines synchrones.*

11. Dans les machines synchrones, la puissance électrique fournie et celle recueillie doivent être mesurées avec le courant en phase avec la tension, excepté quand le contraire est expressément spécifié.

12. Les pertes dans les machines synchrones sont :

a. Frottements des paliers et résistance de l'air (*voir* § 5).

b. Hystérésis et courants de Foucault dans le fer, le cuivre et autres parties métalliques. Ces pertes doivent être déterminées à circuit ouvert, au nombre de tours normal, et à la tension normale $+ Ir$ dans une génératrice synchrone, et $- Ir$ dans un moteur synchrone : $I =$ intensité du courant dans l'induit, et $r =$ résistance de l'induit. Il n'est pas bon de déduire ces pertes de relevés faits à d'autres vitesses ou à d'autres tensions.

Ces pertes sont mesurées soit en actionnant la machine au moyen d'un moteur, soit en la faisant tourner comme moteur synchrone, en réglant son champ de manière à obtenir le courant d'intensité minimum, et en mesurant la puissance fournie au moyen d'un wattmètre. Dans ce dernier cas, on doit, pour les machines polyphasées, employer plusieurs wattmètres, disposés de manière à mesurer la charge non uniformément répartie entre phases. La première méthode est préférable, car la dernière peut être entachée d'erreur causée par des accélérations et des ralentissements dus à une pulsation de la fréquence ou à une tendance à des oscillations pendulaires de l'ensemble.

c. Les pertes dues à la résistance de l'induit, qui peuvent être exprimées par pI^2r, relation dans laquelle $r =$ résistance d'un circuit de l'induit ou d'une branche ; $I =$ intensité du courant dans un circuit ou une branche, et p le nombre de circuits ou de branches de l'induit.

d. Les pertes définies au § 8. Comme ces pertes ne peuvent pas être déterminées individuellement d'une manière commode, et que cependant elles peuvent être considérables, on doit en mesurer

l'ensemble. Ceci peut être fait en faisant fonctionner la machine en court-circuit, avec l'intensité du courant de pleine charge, et en mesurant la perte désignée sous le nom de *perte dans le noyau en court-circuit* (short-circuit core loss). Avec le champ de faible intensité et le grand décalage de courant existant dans ce cas, la perte en charge est ordinairement beaucoup exagérée.

On peut prendre approximativement, quand on n'a pas d'autre renseignement, un tiers des pertes dans le noyau en court-circuit pour la perte en charge.

e. Frottement des bagues collectrices et résistance de contact. Ces pertes sont généralement négligeables, excepté dans les machines à tension excessivement faible.

f. Excitation du champ. Dans les machines à excitation indépendante, on détermine le $I^2 r$ en prenant pour r seulement la résistance des bobines de l'enroulement. Dans les machines auto-excitatrices, cependant, les pertes dans le rhéostat d'excitation doivent être comprises (*voir* § 7 *f*).

3° *Machines synchrones à collecteur.*

13. Pour les convertisseurs synchrones, la puissance, du côté alternatif, doit être mesurée avec le courant en phase avec la f. e. m., à moins que le contraire ne soit expressément spécifié.

14. Pour les génératrices à double courant, le rendement de la machine doit être déterminé, comme pour une génératrice à courant continu, d'après le § 7, et comme pour une génératrice à courant alternatif, d'après le § 12. Les deux valeurs du rendement peuvent être différentes et doivent être clairement distinguées.

15. Pour les convertisseurs, les pertes doivent être déterminées en actionnant la machine au moyen d'un moteur. Les pertes sont :

a. Les frottements des paliers et la résistance de l'air (*voir* § 5).

b. L'hystérésis et les courants de Foucault, dans le fer, le cuivre et les parties métalliques y compris les connexions sur les faces de l'induit. Ces pertes doivent être déterminées à circuit ouvert et à la

tension normale. On ne doit pas tenir compte de la résistance de l'induit, puisque le courant alternatif et le courant continu s'écoulent en des directions opposées.

c. Résistance de l'induit. La perte dans l'induit est qI^2r, $I =$ intensité du courant continu dans l'induit, $r =$ résistance de l'induit, et q un facteur qui est égal à 1,47 pour le courant monophasé à circuit simple, 1,15 pour le courant monophasé avec deux circuits, 0,59 pour le triphasé, 0,39 pour le courant tétraphasé, et 0,27 dans le cas d'hexaphasé.

d. Pertes en charge. La perte en charge doit être déterminée de la même manière qu'il a été indiqué au § 12*d*, en se rapportant au côté continu.

e et *f*. Pertes dans le collecteur et les bagues, frottement et résistance de contact (*voir* §§ 7 et 12).

g. Excitation du champ. Dans le cas d'excitation indépendante on doit prendre la perte I^2r dans les bobines d'excitation seules; dans le cas d'excitation en dérivation ou en série, les pertes dans le rhéostat doivent être comprises, à l'exception du cas où les champs et les rhéostats employés sont modifiés intentionnellement pour produire des actions en dehors de la transformation de la puissance électrique, comme par exemple pour produire un décalage de phase pour le réglage de la tension. Dans ce cas, il convient d'ajouter 25 pour 100 de la perte I^2r dans les bobines d'excitation à charge non inductive, pour tenir compte des pertes normales dans le rhéostat (§ 7*f*).

16. Quand on a à sa disposition deux machines synchrones semblables, leur rendement peut être déterminé en faisant fonctionner l'une des deux, comme un transformateur de courant continu en alternatif, et l'autre comme transformateur de courant alternatif en continu; on connecte alors les côtés alternatifs, et l'on mesure la différence entre le courant continu fourni et le courant continu recueilli.

Ce procédé peut être modifié en faisant passer le courant de la seconde machine à la première à travers deux survolteurs et en mesurant les pertes. Un autre moyen est de compenser les pertes au moyen d'un alternateur intercalé entre les deux machines, en faisant usage de régulateurs de tension.

4° *Redresseurs de courant ou génératrices à courant pulsatoire.*

17. Celles-ci comprennent les machines à circuit ouvert pour arcs, les redresseurs à intensité constante et les redresseurs à tension constante.

Les pertes dans les machines à circuit ouvert pour arcs sont essentiellement les mêmes que celles indiquées aux § 7 à 10 (machines à commutation à bobine fermée). Dans ce cas pourtant les pertes en charge sont d'ordinaire plus élevées, et il faut mesurer le rendement en effectuant les mesures de la puissance absorbée et de la puissance recueillie, et en employant des wattmètres pour cette dernière mesure. Dans le cas des redresseurs de courant alternatif, la puissance doit être mesurée au wattmètre et non à l'ampèremètre et au voltmètre, car, par suite de la pulsation du courant et de la f. e. m., il peut y avoir une différence considérable entre les watts et les voltampères, atteignant plus de 10 à 15 pour 100.

18. Dans les redresseurs à intensité constante transformant un courant alternatif à potentiel constant en courant continu d'intensité constante, au moyen de transformateurs à intensité constante et de commutateurs redresseurs, les pertes dans les transformateurs doivent être comprises dans le rendement et doivent être mesurées le redresseur *b* étant en marche, car dans ce cas les pertes sont généralement plus élevées que lorsqu'on alimente seulement le circuit secondaire avec du courant alternatif. Dans les transformateurs à courant constant, les pertes peuvent être très grandes et ne doivent donc pas être négligées.

La méthode la plus satisfaisante pour déterminer le rendement des redresseurs est de mesurer, au moyen de wattmètres, la puissance fournie et la puissance restituée. La puissance fournie est ordinairement inductive, par suite d'un décalage considérable de phase et de la distorsion de la courbe du courant. Pour cette raison, on doit également tenir compte du rendement apparent, qui est, en général, beaucoup plus faible que le rendement réel. La puissance fournie au moteur synchrone, ou à toute autre source actionnant le redresseur, doit être comprise dans la puissance électrique fournie.

5° *Appareils d'induction sans organes en mouvement.*

19. Comme le rendement des appareils d'induction dépend de la forme de la courbe de la f. e. m., on doit l'évaluer pour une courbe sinusoïdale de la f. e. m., à moins que le contraire ne soit expressément spécifié. Le rendement doit être mesuré à charge non inductive et à fréquence normale, à moins de spécification expresse du contraire.

Les pertes sont les suivantes :

a. Par hystérésis et courants de Foucault, mesurées à circuit ouvert et à la tension normale, — Ir, I étant l'intensité normale, et r la résistance du circuit primaire ;

b. Par résistance, la somme des I^2r pour le primaire et le secondaire dans un transformateur, ou dans les deux sections de la bobine dans un compensateur ou auto-transformateur, I étant l'intensité dans les bobines ou sections de bobines, et r la résistance ;

c. Pertes en charge, c'est-à-dire par courants de Foucault dans le fer, et surtout dans les conducteurs en cuivre, provoquées par le courant. Elles doivent être mesurées en mettant en court-circuit le secondaire du transformateur et en appliquant au primaire une f. e. m. suffisante pour faire circuler un courant d'intensité égale à celle de pleine charge. La perte dans le transformateur, dans ces conditions, mesurée au wattmètre, donne les pertes en charge I^2r dans les enroulements primaire et secondaire.

d. Les pertes dues au système de refroidissement; comme la puissance dépensée par le ventilateur, dans le cas de refroidissement par l'air, ou consommée par le moteur actionnant la pompe dans le cas de refroidissement par huile ou par eau. Quand le même appareil de refroïdissement dessert plusieurs appareils à la fois, ou est disposé pour desservir des appareils à installer, on doit en tenir compte.

20. Dans les régulateurs de tension, le rendement doit être mesuré à la tension la plus élevée à laquelle l'appareil est destiné et à charge non inductive, à moins que le contraire ne soit expressément spécifié.

6° *Appareils d'induction rotatifs.*

21. Comme les pertes dues à la charge, ainsi que l'intensité magnétique, dans les moteurs d'induction, varient d'une manière très complexe avec la charge, le rendement doit être déterminé en mesurant au wattmètre la puissance électrique fournie et en mesurant la puissance mécanique obtenue à la poulie, aux engrenages, au manchon d'accouplement, etc.

22. Le rendement doit être mesuré à la fréquence normale, et la courbe de la f. e. m. appliquée doit être une sinusoïde.

23. Le rendement peut être déduit de la puissance apparente fournie, du facteur de puissance et de la puissance recueillie. Ces conditions s'appliquent également aux alternateurs d'induction. Comme le décalage de phase est inhérent aux machines d'induction, leur rendement apparent présente aussi de l'intérêt.

24. Dans les transformateurs (*changers*) de fréquence, c'est-à-dire les appareils transformant un courant alternatif en courant alternatif de fréquence différente, avec ou sans changement du nombre de phases ; puis dans les appareils transformant un courant alternatif ordinairement monophasé en courant alternatif d'un autre système, ordinairement polyphasé, de même fréquence, le rendement doit être déterminé en mesurant la puissance fournie ainsi que la puissance recueillie.

7° *Lignes de transmission.*

25. Le rendement des lignes de transmission doit être mesuré avec une charge non inductive, à l'extrémité réceptrice, et à tension et fréquence normales à cette extrémité, et avec une f. e. m. appliquée de forme sinusoïdale, excepté quand le contraire est expressément spécifié, et en ne branchant ni transformateur ni autres appareils aux extrémités de la ligne.

ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE.

Principes généraux.

26. Dans des conditions régulières de service, la température des machines électriques ne doit jamais s'élever de manière à provoquer une détérioration permanente des isolants.

27. L'élévation de température sera évaluée en admettant, comme température normale de la salle d'essai, 25° C., à la pression barométrique de 760mm, dans les conditions normales de ventilation, c'est-à-dire que les appareils ne seront ni ventilés ni enfermés, excepté quand cela est expressément spécifié.

28. Si la température de la salle, pendant l'essai, diffère de 25°, l'élévation de température relevée sera corrigée de 0,5 pour 100 pour chaque degré centigrade. De sorte que pour une salle à la température de 35° l'élévation de température observée doit être diminuée de 5 pour 100, tandis que si la salle est à 15° l'élévation de température observée doit être augmentée de 5 pour 100. Le thermomètre indiquant la température de la salle doit être à l'abri des radiations émises par des surfaces chaudes, ainsi qu'à l'abri des courants d'air. Quand il est impossible de se placer dans des conditions normales, soit par suite de la présence d'une machine voisine ou d'autres sources de chaleur, le thermomètre servant à mesurer la température de l'air devra être placé de manière à indiquer la température que la machine devrait prendre si elle ne marchait pas, de manière que l'élévation de température constatée soit bien celle provoquée par le fonctionnement de la machine.

29. La température doit être mesurée après une marche d'une durée suffisante pour qu'elle ait atteint une valeur pratiquement constante. Ceci a lieu ordinairement au bout d'une durée de 6 à 18 heures, dépendant de la puissance et du genre de la machine. Il est cependant admissible de diminuer la durée de l'essai en faisant fonctionner la machine pendant un temps moindre, avec une surcharge de courant et de tension, puis en réduisant ensuite la charge

à sa valeur normale, et en faisant fonctionner dans ces conditions la machine jusqu'à ce que la température reste constante.

Pour les appareils destinés à un service intermittent, tels que les moteurs de tramways, les rhéostats de démarrage, etc., l'élévation de température doit être mesurée, après un fonctionnement se rapprochant autant que possible des conditions du service auquel l'appareil est destiné et l'on doit spécifier les conditions de l'essai.

Dans les appareils qui, par la nature du service auquel ils doivent être soumis, sont exposés à des surcharges, comme des convertisseurs pour traction, ou des appareils placés dans des circuits à très haute tension, on doit spécifier une élévation de température moindre que pour des appareils qui ne doivent pas être surchargés ou qui sont destinés à fonctionner à basse tension.

Pour les appareils construits de manière à occuper un espace limité, comme les moteurs de traction, on peut admettre une élévation de température plus grande.

30. Pour les conducteurs électriques, l'élévation de température doit être déterminée par l'accroissement de résistance, quand cela est possible.

Dans ce but, la résistance doit être mesurée soit au moyen d'un galvanomètre soit par la méthode de la chute de potentiel.

Pour le cuivre [1], on peut admettre un coefficient d'augmentation de résistance de 0,42 pour 100 par degré centigrade à partir de et à 0° C.

En mesurant ainsi les élévations de température, on obtient ordinairement des valeurs plus élevées qu'en employant des thermomètres.

Quand on applique un thermomètre sur la surface d'une machine,

---

[1] Au moyen des relations :

$$R_t = R_0(1 + 0,0042\,t),$$
$$R_{t+\theta} = R_0[1 + 0,0042\,(t + \theta)],$$

dans lesquelles R_t est la résistance initiale à la température $t°$ de la salle; $R_{t+\theta}$ est la résistance finale à l'élévation de température θ; R_0 la résistance à 0°. On obtient en les combinant la relation :

$$\theta = (238,1 + t)\left(\frac{R_{t+\theta}}{R_t} - 1\right) \text{ degrés centigrades.}$$



il est bon que la boule de l'appareil soit recouverte par un bourrelet d'une surface donnée. Un bourrelet convenable pourra être constitué par des déchets de coton, placés dans une boîte circulaire peu profonde de 1 pouce et demi de diamètre environ, la boule du thermomètre étant introduite par une ouverture percée sur le côté. Un bourrelet trop grand, au-dessus du thermomètre, tend à gêner la dispersion naturelle de la chaleur par la surface sur laquelle le thermomètre est appliqué.

31. Pour les appareils dans lesquels la matière isolante a des qualités spéciales de résistance à la chaleur, on peut admettre une élévation de température plus grande.

32. Pour les appareils devant être mis en service dans des endroits où la température est exceptionnellement élevée, on doit spécifier une élévation de température moindre.

33. Il est à recommander de ne pas dépasser, pour l'élévation de température, les valeurs maxima indiquées ci-après :

Machines à commutation, redresseurs et machines synchrones.

Champ et induit par résistance, 50° C.
Collecteurs, bagues, balais, au thermomètre, 55° C.
Paliers et autres parties de la machine, au thermomètre, 40° C.

Appareils rotatifs d'induction.

Circuits électriques, 50° C. par résistance.
Paliers et autres parties de la machine, 40° C. au thermomètre.
Pour les cages d'écureuil et les induits en court-circuit, on peut admettre 55° C. dans la mesure au thermomètre.

Transformateurs pour service continu.

Circuits électriques par résistance, 50° C. Autres parties au thermomètre, 40° C., dans les conditions normales de ventilation.

Bobines à réaction, régulateur d'induction et régulateurs magnetiques.

Circuits électriques par résistance, 50° C. Autres parties au thermomètre, 40° C.

Quand un thermomètre appliqué sur une bobine ou un enroulement indique une élévation de température plus élevée que celle mesurée par résistance, on doit prendre comme valable l'indication du thermomètre. En faisant usage du thermomètre, on doit veiller à protéger sa boule et à éviter les pertes par rayonnement, et d'autre part faire attention que l'application de l'instrument ne gêne pas sensiblement le rayonnement normal de la surface à l'endroit où il est appliqué.

34. Dans le cas d'appareils destinés à un service intermittent, à l'exception des moteurs pour traction, l'élévation de température atteinte à la fin de la période correspondant à celle de pleine charge en service ne doit pas excéder 50° C. pour les circuits électriques, la mesure étant faite par résistance. Dans le cas de transformateurs destinés à un service intermittent, ou bien ne fonctionnant pas tout le temps à pleine charge, mais restant toujours en circuit, ce qui est le cas ordinaire des transformateurs pour éclairage, l'élévation de température au-dessus de celle de l'air ambiant ne doit pas dépasser, dans les circuits électriques, 50° C., la température étant mesurée par résistance, et dans les autres parties, 40° C., la mesure se faisant au thermomètre, après la période de fonctionnement correspondant à la durée de pleine charge. Dans ces conditions, l'essai en charge ne doit commencer que quand l'appareil a été assez longtemps en circuit, pour que le régime de température correspondant aux pertes dans le noyau soit atteint. Pour les transformateurs pour éclairage commercial, l'essai à pleine charge peut durer 3 heures, à moins de conventions spéciales contraires.

Pour le cas de moteurs pour tramways, grues, ascenseurs, les conditions de service sont tellement variables que l'on ne peut fixer une durée déterminée pour les essais à pleine charge.

35. La puissance nominale commerciale d'un moteur de traction est le nombre de chevaux qu'il peut fournir en fonctionnant d'une



manière continue pendant 1 heure, sa température s'élevant au bout de ce temps de 75° C. au-dessus de la température ambiante supposée de 25° C., la tension aux bornes étant de 500 v., le moteur étant placé sur la plate-forme d'essai et les couvercles retirés.

Pour déterminer la température de service d'un moteur de traction, on doit mesurer l'élévation de température en le faisant fonctionner sur une voie en ligne droite et en palier, ses conditions de marche étant bien spécifiées, ce sont :

1° Le poids remorqué en tonnes par moteur ;
2° La vitesse commerciale en milles par heure ;
3° Le nombre d'arrêts par mille ;
4° La durée des arrêts en secondes ;
5° L'accélération à obtenir en milles par heure, par seconde ;
6° Le ralentissement à obtenir pour le freinage en milles par heure, par seconde.

Ces spécifications doivent être déterminées et acceptées comme équivalentes au service courant, et les moteurs doivent être ouverts ou fermés, suivant les conditions dans lesquelles ils doivent fonctionner en service.

Les essais doivent être faits dans les deux directions sur la même voie.

On doit entendre, sous la désignation de *palier*, une voie où les inclinaisons en aucun point ne doivent dépasser un demi pour 100.

Sous la désignation de voie en ligne droite, on doit entendre une voie dans laquelle le rayon de courbure n'est nulle part moindre que l'espace parcouru par la voiture en 30 secondes, à la vitesse maximum atteinte pendant la marche.

La vitesse du vent, dans n'importe quelle direction, ne doit pas pendant les essais dépasser 10 milles par heure.

ISOLEMENT.

36. La résistance d'isolement ohmique est d'importance secondaire, par rapport aux essais de rigidité ou résistance à la rupture à haute tension.

En effet, la résistance ohmique peut être considérablement augmentée en séchant la machine, tandis que la rigidité des isolements peut en être diminuée ; il est préférable d'exiger une grande résistance

des diélectriques qu'une grande résistance d'isolement. L'essai à haute tension de la force des diélectriques doit toujours être entrepris.

Résistance d'isolement.

37. Les essais de résistance d'isolement doivent autant que possible être exécutés à la tension de service.

La résistance d'isolement de l'appareil complet doit être telle qu'à la tension normale de service il n'y ait pas une perte de plus de $\frac{1}{1000000}$ du courant de pleine charge. Quand la valeur ainsi déterminée dépasse 1 mégohm, 1 mégohm est suffisant.

Rigidité du diélectrique.

38. La rigidité du diélectrique, ou résistance à la rupture doit être déterminée par l'application d'une f. e. m. alternative pendant une minute. La source de la f. e. m. alternative doit être un transformateur dont les dimensions soient telles que le courant de charge de l'appareil faisant office de condensateur ne dépasse pas 25 pour 100 de la capacité normale du transformateur.

39. Pour les appareils à courant alternatif, l'essai doit être fait à la fréquence pour laquelle l'appareil est construit.

40. L'essai à haute tension ne doit pas être entrepris quand l'isolement est affaibli, par suite de dépôts de poussière ou d'humidité; il doit être fait avant de mettre la machine en service commercial.

Les essais de haute tension doivent être entrepris à la température atteinte dans les conditions normales, ainsi qu'il est indiqué au § 2 sous le titre « rendement ».

41. On doit remarquer que des essais à une tension considérablement plus élevée que la tension normale, afin de déterminer si les conditions sont remplies, ne sont admissibles que quand les machines sont neuves.

42. L'épreuve de rigidité des diélectriques doit être entreprise sur la machine complètement montée et non individuellement sur

ses diverses parties, et la tension doit être appliquée comme il suit ([1]) :

1° Entre les circuits électriques et les matières conductrices voisines;

2° Entre les circuits électriques adjacents, quand il y en a, comme dans les transformateurs.

Les essais doivent être faits avec une f. e. m. sinusoïdale, ou, si l'on ne dispose pas d'une telle f. e. m., à une tension donnant la même distance disruptive entre des pointes d'aiguilles que la f. e. m. sinusoïdale spécifiée, excepté quand le contraire est formellement spécifié.

Comme pointes on doit employer des aiguilles à coudre neuves.

Il est recommandé lors de l'essai de shunter l'appareil, au moyen d'aiguilles séparées par un espace d'air correspondant à une tension de 10 pour 100 plus élevée que celle spécifiée.

Une table des distances disruptives approximatives est donnée dans l'annexe V ([2]).

43. Les tensions suivantes sont à recommander pour les appareils, non compris les lignes et les tableaux :

Tension normale aux bornes.				Puissance normale.	Tension d'essai.
Ne dépassant pas 400 v				Moins de 10 k. w.	1000 v.
id.				10 k. w. et au-dessus	1500 v.
400 v.	et plus, mais	moins de	800 v.	Moins de 10 k. w.	1500 v.
400 v.	id.	id.	800 v.	10 k. w. et au-dessus	2000 v.
800 v.	id.	id.	1200 v.	Toute puissance	3500 v.
1200 v.	id.	id.	2500 v.	id.	5000 v.
2500 v.	id.	id.	10000 v.	id.	Deux fois la tension normale
10000 v.	id.	id.	20000 v.	id.	10000 v. au-dessus de la tension normale
20000 v.	id.			id.	50 % au-dessus de la tension normale

Font exception les transformateurs pour 5000 v. et au-dessous, desservant directement des circuits d'utilisation qui doivent être essayés à 10000 v.

([1]) Ce paragraphe 42 a été renvoyé à la Commission par le Congrès avec pouvoir de l'amender, il sera subséquemment revisé.

([2]) *Voir* p. 35.

Les circuits d'excitation des moteurs synchrones et des convertisseurs devant démarrer par le côté alternatif, doivent être essayés à 5000 v.

Les circuits d'excitation des alternateurs doivent être soumis à une tension d'essai, correspondant à la tension normale de l'excitatrice, en se rapportant à une puissance égale à celle de l'alternateur lui-même, c'est-à-dire que dans cet essai l'excitatrice doit être considérée comme ayant une puissance égale à celle de la machine qu'elle dessert.

Les condensateurs doivent être essayés à une tension double de leur tension normale et à leur fréquence normale.

Les valeurs indiquées dans le Tableau ci-dessus sont les valeurs efficaces, ou la racine carrée de la somme des carrés moyens, pour une f. e. m. sinusoïdale.

44. Quand on fait l'essai d'isolement entre différents circuits électriques, comme entre le primaire et le secondaire d'un transformateur, la tension d'essai doit correspondre à celle du circuit à haute tension.

45. Pour les transformateurs de 20000 v. et au-dessus, il est suffisant d'essayer le transformateur en employant une tension de 50 pour 100 supérieure à sa tension normale; si cela est nécessaire, on peut augmenter la fréquence pour obtenir la tension voulue.

46. L'essai d'isolement d'un transformateur, quand on n'a pas à sa disposition un transformateur d'essai, peut être fait de la manière suivante : on relie une des bornes de l'enroulement à haute tension au noyau et à l'enroulement à basse tension et l'on renouvelle l'essai en reliant de la même manière l'autre borne de l'enroulement à haute tension. L'essai de résistance du diélectrique, entre l'enroulement à basse tension et le noyau, doit être fait d'après les prescriptions de l'article **43** pour la tension et la puissance correspondantes.

47. Les essais à haute tension des transformateurs ou autres appareils doivent être basés sur la tension entre les conducteurs des circuits auxquels ils sont reliés.

48. Quand des machines et des appareils doivent fonctionner en

série, de manière à obtenir la somme de leurs f. e. m., la tension d'essai doit se rapporter à cette somme, excepté dans le cas où les bâtis des machines sont isolés à la fois du sol et entre eux.

L'isolement entre les machines et entre chaque machine et le sol doit être essayé dans le premier cas, en se référant à la tension d'une machine, et dans le second cas à la tension totale de la série.

49. Les câbles souterrains et les interrupteurs de lignes doivent être essayés en appliquant une f. e. m. alternative pendant 1 minute, ayant une tension double de celle sous laquelle le câble ou l'interrupteur doit fonctionner en service.

RÉGULATION.

50. Le terme *régulation* a la même signification que le terme « régulation propre » (inherent regulation) fréquemment employé aujourd'hui.

51. La régulation d'un appareil destiné à une tension constante, une intensité constante, une vitesse constante, etc. doit être mesurée pour la variation maximum de la tension du courant, de la vitesse, etc., en partant de la pleine charge pour aboutir à une charge nulle, l'appareil fonctionnant dans les mêmes conditions qu'à pleine charge, cette dernière étant toujours considérée comme marche normale.

52. La régulation d'un appareil devant fournir une tension, un courant, une vitesse, etc., devant varier dans des proportions données entre la pleine charge et le fonctionnement à vide, doit être mesurée par l'écart maximum entre la valeur mesurée de la tension, le courant, la vitesse, etc. et la valeur fixée, la machine fonctionnant dans les conditions requises pour obtenir la valeur normale à pleine charge.

Si la manière dont doit varier le courant, la tension, la vitesse, etc. entre la pleine charge et le fonctionnement à vide, n'est pas spécifiée, on doit admettre que c'est une variation simplement linéaire, c'est-à-dire que la variation est uniforme entre la pleine charge et la charge nulle.

La régulation d'un appareil diffère donc suivant l'usage auquel il est destiné. Ainsi la régulation d'une génératrice compound désignée comme génératrice à tension constante est différente de celle qu'elle

devrait avoir si elle était désignée comme génératrice hypercompound.

53. La régulation est indiquée en pour 100 de la valeur à pleine charge, de la tension, du courant, de la vitesse, etc. et l'appareil doit fonctionner, pendant toute la durée de l'essai, dans les mêmes conditions qu'à pleine charge.

54. La régulation des génératrices est à déterminer à vitesse constante, et pour les appareils à courant alternatif à fréquence constante.

55. La régulation d'un groupe électrogène constitué par une génératrice actionnée par un moteur doit être déterminée, le moteur restant dans les mêmes conditions, c'est-à-dire pression constante de la vapeur, ou de l'eau, etc. Elle devra comprendre les variations de vitesse inhérentes au moteur. Pour cette raison, la régulation d'un groupe électrogène doit être distinguée de la régulation du moteur et de celle de la génératrice, relevées séparément.

56. Pour les appareils fournissant, transformant ou transmettant du courant alternatif, la régulation doit se rapporter au cas de charges non inductives, c'est-à-dire à une charge où le courant est en phase avec la f. e. m. à la sortie de l'appareil, excepté quand le contraire est expressément spécifié.

57. Pour les appareils à courant alternatif recevant de la puissance électrique, la régulation doit se référer à une f. e. m. sinusoïdale, excepté quand le contraire est expressément spécifié.

58. Dans les machines à commutation, les redresseurs, les machines synchrones comme les génératrices et les moteurs à courant continu, les génératrices à courant alternatif et polyphasé, la régulation doit être déterminée dans les conditions suivantes :

a. A excitation constante, quand l'excitation est indépendante.

b. Avec une résistance constante dans le circuit d'excitation en dérivation.

c. Avec une résistance constante shuntant les bobines de champ en séries, c'est-à-dire que le réglage du champ doit rester constant, et être choisi de telle sorte que l'on obtienne la tension voulue à pleine charge avec le courant de pleine charge.

59. Dans les machines à potentiel constant, la régulation est le rapport de la différence maximum entre la tension aux bornes (relevée entre la pleine charge et la marche à circuit ouvert) et la tension normale à pleine charge à la tension normale à pleine charge.

60. Pour les machines à courant constant, la régulation est le rapport de la différence maximum entre l'intensité du courant (observée entre la pleine charge et le court-circuit, ou la limite inférieure fixée pour le fonctionnement) et l'intensité normale à pleine charge à l'intensité normale à pleine charge, à vitesse constante; ou pour les transformateurs, etc. à tension et à fréquence constantes.

61. Pour les appareils à puissance constante, la régulation est le rapport de la différence maximum entre la puissance (relevées entre les limites de fonctionnement spécifiées) et la puissance normale à pleine charge à la puissance normale à pleine charge.

62. Dans les machines hypercompoundées, la régulation est le rapport de la différence maximum entre la tension observée et celle correspondant, en fonction de l'intensité du courant, à une ligne droite reliant la tension aux bornes à vide à celle à pleine charge à la tension normale à pleine charge.

63. Pour les moteurs à courant continu à vitesse constante, la régulation est le rapport de la différence maximum entre la vitesse (observée entre la pleine charge et la charge nulle) et la vitesse normale à pleine charge à la vitesse normale à pleine charge.

64. Pour les transformateurs à potentiel constant non inductifs, la régulation est le rapport de l'élévation de la tension au secondaire entre la pleine charge et la charge nulle (à tension primaire constante aux bornes) à la tension secondaire aux bornes.

65. Dans les moteurs d'induction, la régulation est le rapport de l'augmentation de vitesse entre la pleine charge et la charge nulle (à tension constante) à la vitesse à pleine charge.

La régulation d'un moteur d'induction n'est par conséquent pas identique au glissement du moteur, qui est le rapport de la variation de vitesse à la vitesse au synchronisme.

66. Pour les convertisseurs, les dynamo-moteurs, les moteurs générateurs, les transformateurs de fréquence, la régulation est le rapport de la différence maximum entre la tension aux bornes et la tension normale à pleine charge, à la tension normale à pleine charge du côté où l'on recueille le courant (à tension appliquée constante et à fréquence constante).

67. Dans les lignes de transmission, feeders, etc., la régulation est le rapport de la différence maximum à l'extrémité réceptrice, entre la tension à charge nulle et la tension à pleine charge non inductive, à la tension à pleine charge à l'extrémité réceptrice, la tension restant constante à l'extrémité d'où est envoyé le courant.

68. Dans les machines à vapeur la régulation est le rapport de la différence maximum de vitesse, en passant de la pleine charge à la la charge nulle (à pression constante de vapeur au distributeur) à la vitesse à pleine charge.

69. Pour une turbine ou tout autre moteur hydraulique, la régulation est le rapport de la différence maximum de vitesse entre la pleine charge et la charge nulle (à pression constante de l'eau, c'est-à-dire à différence de niveau constante entre l'amont et l'aval) à la vitesse à pleine charge.

70. Dans les appareils à courant alternatif, en outre de la régulation non inductive, le rapport d'impédance de l'appareil doit être indiqué, c'est-à-dire le rapport de la tension absorbée par l'impédance interne totale de l'appareil avec le courant de pleine charge à sa tension normale à pleine charge. On doit employer, autant que possible, un courant sinusoïdal.

71. Quand dans les machines synchrones la régulation est calculée pour la tension aux bornes et la tension d'impédance, les ampères-tours d'excitatiou correspondant à la tension aux bornes, augmentés de la chute de tension due à la résistance de l'induit, et les ampères-tours en court-circuit, correspondant à l'impédance de l'armature, doivent être combinés vectoriellement, afin d'obtenir les

ampères-tours résultants et la force f. e. m. interne correspondante et déduite de la caractéristique à vide [1].

VARIATION ET PULSATION.

72. Pour les moteurs qui n'ont pas une vitesse absolument uniforme, comme les moteurs à vapeur, la *variation* est le déplacement angulaire maximum exprimé en degrés entre la position d'un point de la partie tournante et la position que ce point devrait occuper si la rotation était uniforme, en prenant la rotation complète égale à 360°. La *pulsation* est le rapport de la variation maximum de vitesse à la vitesse moyenne dans un cycle.

73. Pour les alternateurs et les circuits à courant alternatif en général, la *variation* est la différence de phase maximum exprimée en degrés entre la courbe de la f. e. m. produite et la courbe à fréquence absolument constante, et est due à la variation du moteur. La *pulsation* est le rapport de la variation maximum de fréquence pendant un cycle du moteur à la fréquence moyenne.

74. Si n est le nombre de pôles, la variation d'un alternateur est $\frac{n}{2}$ fois la variation du moteur dans le cas d'accouplement direct et $\frac{n}{2}p$ fois dans le cas où l'accouplement est rigide, mais où le rapport des vitesses est p.

SPÉCIFICATIONS.

75. La puissance électrique et la puissance mécanique doivent toutes deux être exprimées en k. w. à moins que le contraire ne soit expressément spécifié. La puissance des appareils à courant alternatif doit être désignée en k. w. en se rapportant au courant non inductif, c'est-à-dire avec le courant en phase avec la tension aux bornes.

76. Donc la puissance électrique fournie par une génératrice à courant alternatif est égale à la puissance spécifiée seulement quand la charge est non inductive, c'est-à-dire quand le courant est en phase avec la tension aux bornes.

---

[1] Le paragraphe 71 a été renvoyé par le Congrès à la Commission, avec pouvoir de l'amender; il pourra donc être revisé.

77. La puissance apparente doit être exprimée en kilovoltampères afin de la distinguer de la puissance réelle en k. w.

78. Quand un facteur de puissance plus petit que 100 pour 100 est indiqué, la spécification doit être donnée pour la pleine charge en kilovoltampères, avec indication du facteur de puissance.

79. Le courant de pleine charge d'une génératrice électrique est le courant qui, avec la tension normale à pleine charge, donne les k. w. spécifiés, mais dans le cas des appareils à courant alternatif, ce courant correspond seulement à la charge non inductive.

80. Quand pour une machine la tension à pleine charge diffère de la tension à charge nulle, le courant de pleine charge doit correspondre à la tension à pleine charge.

Si P est la puissance spécifiée d'une génératrice électrique, et E la tension aux bornes à pleine charge, le courant de pleine charge est :

$I = \frac{P}{E}$ pour une machine à courant continu ou à courant alternatif monophasé,

$I = \frac{P}{E\sqrt{3}}$ pour un alterneur triphasé,

$I = \frac{P}{2E}$ pour un alternateur tétraphasé.

81. Les machines à courant d'intensité constante, telles que celles pour l'éclairage, au moyen d'arcs en série, doivent être spécifiées en kilowatts, en se basant sur les ampères et la tension aux bornes à pleine charge.

82. La spécification d'un fusible ou d'un disjoncteur est l'intensité du courant qu'il peut supporter d'une manière continue. On doit également spécifier l'intensité du courant pour laquelle il entre en fonctionnement.

CLASSIFICATION DES TENSIONS ET DES FRÉQUENCES.

83. Pour les génératrices à courant continu à basse tension, les tensions suivantes sont généralement en usage et sont recommandées :

125 v., 250 v., 550 v.

84. Pour les circuits à courant continu et à courant alternatif à basse tension, les tensions suivantes à l'extrémité sont généralement en usage et sont recommandées :

110 v., 220 v.

Pour les circuits de transport de puissance pour les tramways et autres services, 500 v. sont généralement admis et peuvent être considérés comme réglementaires.

85. Pour les circuits primaires alternatifs à tension constante, une f. e. m. de 2200 v. avec transformateurs réducteurs, ayant un rapport de transformation de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$, est généralement employée et est recommandée.

86. Pour les circuits primaires alternatifs à tension constante et hauts voltages, les tensions suivantes sont généralement employées et sont recommandées :

6000, 10000, 15000, 20000, 30000, 40000, 60000 v.

87. Dans les génératrices ou systèmes générateurs à courant alternatif, on doit prévoir une augmentation de tension de 10 pour 100, au-dessus de la tension à charge nulle, afin de racheter les pertes dans la transmission. Si une plus grande augmentation que 10 pour 100 est spécifiée, la génératrice est considérée comme spéciale.

88. Les fréquences approximatives suivantes sont recommandées pour les circuits à courant alternatif,

25 ∼, 60 ∼, 120 ∼ [1].

Ces fréquences sont très en usage et il est désirable de les adopter.

VALEURS DES SURCHARGES.

89. Toutes les garanties relatives à l'échauffement, à la régulation, à la production d'étincelles, etc., doivent se rapporter à la charge normale à moins que le contraire ne soit expressément spécifié et pour les appareils à courant alternatif, au cas où le courant est en

---

[1] La fréquence de 120 ∼ peut être considérée comme remplaçant les fréquences existant de 120 ∼ à 140 ∼.

phase avec la tension aux bornes, excepté dans le cas où un décalage est inhérent à l'appareil.

90. Tous les appareils doivent être capables de supporter la surcharge spécifiée au § **92**, sans être détériorés par suite de l'élévation de température, de la production d'étincelles, du manque de résistance mécanique, etc., et avec un surcroît d'élévation de température ne dépassant pas de 15° C. l'élévation fixée pour la pleine charge : la surcharge étant appliquée après que l'appareil a acquis la température du régime à pleine charge (*voir* §§ **30** à **34**).

91. Les garanties pour la surcharge doivent se rapporter aux conditions normales de fonctionnement, au point de vue de la vitesse, de la fréquence, de la tension, etc., et pour des charges non inductives, dans le cas d'appareils à courant alternatif, à moins qu'un décalage de phase ne soit inhérent à l'appareil.

92. Les valeurs suivantes sont recommandées pour la surcharge :

1° Pour les génératrices à courant continu et à courant alternatif, 25 pour 100 pendant 2 heures;

2° Pour les moteurs à courant continu, les moteurs d'induction et les moteurs synchrones, 25 pour 100 pendant 2 heures et 50 pour 100 pendant une minute;

3° Convertisseurs synchrones, 50 pour 100 pendant une demi-heure;

4° Transformateurs, 25 pour 100 pendant 2 heures. Excepté pour les transformateurs desservant des appareils pour lesquels une autre surcharge est garantie, cas pour lequel les mêmes garanties de surcharge que pour l'appareil doivent être appliquées pour le transformateur;

5° Pour les excitatrices des alternateurs et autres machines synchrones, 10 pour 100 de surcharge de plus qu'il n'est nécessaire pour l'excitation de la machine synchrone, à la surcharge garantie, et cela pour la même durée de la surcharge;

6° Toutes les excitatrices des alternateurs mono et polyphasés doivent être capables de donner, à vitesse constante, une tension suffisante pour exciter l'alternateur fonctionnant à vitesse normale, à la tension normale de pleine charge, pour la puissance apparente

spécifiée en kilovoltampères le facteur de puissance étant de 50 pour 100.

(Les paragraphes suivants, de 93 à 98, se rapportent aux sources lumineuses.)

ANNEXE I.

RENDEMENT.

Rendement des appareils destinés à produire un décalage de phase. — Dans les appareils produisant un décalage, par exemple les compensateurs synchrones, les excitatrices des génératrices d'induction, les bobines à réaction, les condensateurs, les éléments de polarisation, etc., le rendement doit être défini comme étant le rapport des voltampères recueillis aux voltampères plus la perte de puissance.

Le rendement doit être calculé en déterminant individuellement les pertes, en les ajoutant aux voltampères recueillis et en divisant les voltampères recueillis par la somme.

1° Dans les compensateurs synchrones et dans les excitatrices des génératrices d'induction, la détermination des pertes a lieu de la même manière que pour les autres machines synchrones. comme il est indiqué aux §§ 11 et 12.

2° Dans les bobines à réaction on a des pertes par hystérésis, par courants de Foucault, et $I^2 r$. Elles doivent être mesurées au w. m. Le rendement des bobines à réaction doit être mesuré en employant une f. e. m. sinusoïdale, excepté dans le cas où le contraire est expressément spécifié. Dans les bobines à réaction les pertes peuvent être considérables.

3° Dans les condensateurs, les pertes sont dues à l'hystérésis du diélectrique et aux pertes de courants, elles doivent être mesurées au w. m. avec une f. e. m. sinusoïdale.

4° Dans les éléments de polarisation les pertes sont dues à la résistance électrique, et à une sorte d'hystérésis de nature chimique, et sont ordinairement très considérables. Elles dépendent de la fréquence de la tension et de la température et doivent être déterminées avec une f. e. m. sinusoïdale, excepté quand le contraire est expressément spécifié.

ANNEXE II.

RENDEMENT APPARENT.

Dans les appareils pour lesquels un décalage de phase est inhérent au fonctionnement, la résistance apparente doit être définie comme étant le rapport de la puissance réelle recueillie aux voltampères fournis.

De tels appareils sont les moteurs d'induction, les convertisseurs synchrones à réaction, les convertisseurs synchrones réglant la tension dans un réseau à courant alternatif, les moteurs synchrones auto-excitateurs, les régulateurs de potentiel, les transformateurs à circuit magnétique ouvert, etc.

Comme le rendement apparent des appareils générateurs de puissance électrique dépend du facteur de puissance de la charge, le rendement apparent de ces appareils, à moins de convention contraire, doit se rapporter à un facteur de puissance pour la charge, égal à l'unité.

ANNEXE III.

FACTEUR DE PUISSANCE ET FACTEUR D'INDUCTANCE.

Le *facteur de puissance*, pour les circuits et les appareils à courant alternatif, peut être défini comme étant le rapport de la puissance électrique exprimée en watts, aux voltampères.

Le *facteur d'inductance* doit être considéré comme étant le rapport des voltampères déwattés aux voltampères totaux.

De sorte que, si $p =$ facteur de puissance et $q =$ facteur d'impédance, on a :

$$p^2 + q^2 = 1.$$

Le facteur de puissance est :

$$\frac{\text{(Composante d'énergie du courant ou de la f. e. m.)}}{\text{(Courant ou f. e. m. total)}} = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{voltampères}}.$$

Le facteur d'inductance est :

$$\frac{\text{(composante déwattée du courant ou de la f. e. m.)}}{\text{(courant ou f. e. m. total)}}.$$

Comme le facteur de puissance des appareils fournissant de la puissance électrique dépend du facteur de puissance de la charge, le facteur de puissance de la charge doit être pris égal à l'unité, à moins que le contraire ne soit expressément spécifié.

L'annexe IV se rapporte aux lettres à employer pour la désignation des diverses valeurs et l'annexe V et dernière donne les distances disruptives (*voir* p. 35).

Règlement allemand.

Les normes pour les machines et transformateurs électriques [1] ont été élaborées par une Commission de l'Association des électrotechniciens allemands présidée par M. Dettmar. Le Congrès de Dresde, en 1901, les accepta et décida leur mise en vigueur pour une durée de une année. A la suite de ce premier essai quelques modifications y furent apportées et le Congrès de 1902 réuni à Dusseldorf adopta le règlement modifié pour une nouvelle période de une année.

Nous donnons ci-dessous la traduction des prescriptions actuellement en vigueur.

DÉFINITIONS.

On désigne sous le nom de *génératrice,* ou simplement *dynamo*, toute machine rotative qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique; sous le nom de *moteur*, toute machine rotative transformant l'énergie électrique en énergie mécanique.

Un *moteur générateur* est une machine double, constituée par l'accouplement mécanique direct d'un moteur et d'une génératrice.

Une *commutatrice* (Uniformer) est une machine dans laquelle la transformation du genre de courant a lieu dans un induit commun.

Si, dans ce qui suit, le terme machine électrique ou machine est

---

(1) *Normalien für elektrische Maschinen und Transformateur*. Nous avons traduit le mot allemand « Normalien » par *normes* comme l'a fait du reste la Société électrotechnique suisse. Le terme n'est peut-être pas tout à fait correct, mais il rend bien le mot *Normalien* qui est à peu près intraduisible autrement.

(2) M. Dettmar a fait paraître des commentaires sur le règlement, dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift,* cahier 23 de 1903.

employé, quoique à tort, on doit comprendre sous cette désignation, suivant le cas, un des appareils définis ci-dessus.

L'*induit* (Anker) d'une machine électrique est la partie dans laquelle, sous l'influence d'un champ magnétique, des f. e. m. sont induites.

Un *transformateur* est un appareil pour courant alternatif n'ayant aucune de ses parties mobile, servant à la transformation de l'énergie électrique en énergie électrique.

Sous la dénomination de *tension* dans le cas de courants triphasés, on doit comprendre la tension efficace composée (tension entre deux des trois conducteurs principaux).

Sous la dénomination de *tension étoilée* (Sternspannung) dans le cas des courants triphasés, on doit comprendre la tension entre le point neutre et chacun des trois conducteurs principaux.

Sous la dénomination de *rapport de transformation* (Uebersetzung) pour les transformateurs, on doit comprendre les rapports des tensions lors du fonctionnement à vide.

La *fréquence* est le nombre de périodes complètes par seconde.

Les prescriptions indiquées pour le courant alternatif simple sont applicables avec les modifications convenables, aux courants polyphasés.

PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES.

Les prescriptions suivantes ne sont valables qu'autant qu'elles ne sont pas contredites par les stipulations formelles d'un marché accepté par les deux parties.

Exception est faite pour les prescriptions relatives aux plaques indicatrices de régime (*voir* § 4, 5 et 6) qui doivent toujours être remplies.

Les machines et les transformateurs non munis de plaques indicatrices de régime, ou pour lesquels la plaque indicatrice serait autre que celle prescrite ci-après, ne seront pas considérés comme répondant aux présentes normes.

PUISSANCE.

§ 2. Pour toutes les machines ou transformateurs, la puissance est celle débitée. Celle-ci doit être indiquée, pour le courant con-

tinu en k. w., pour le courant alternatif en k. w. avec indication du facteur de puissance. Quand on indique la puissance mécanique, elle doit être exprimée en chevaux.

On doit en outre donner, sur la plaque indicatrice de la puissance (*voir* § 4, 5 et 6) ou sur une plaque spéciale, les valeurs normales du nombre de tours, respectivement de la fréquence, de la tension et de l'intensité du courant.

§ 3. Au point de vue de la puissance, on doit distinguer les régimes de fonctionnement suivants :

a. Le *service intermittent,* pour lequel les périodes alternatives de travail et de repos peuvent s'exprimer en minutes (par exemple les moteurs pour grues, ascenseurs, traction, etc.).

b. Le *service momentané,* pour lequel la période de travail est plus courte que celle nécessaire pour atteindre la température de régime stationnaire, et la période de repos a une durée assez longue pour que la température redevienne à peu près égale à celle de l'air ambiant.

c. Le *service continu,* dans lequel la période de travail est assez longue pour que la température de régime finisse par s'établir d'une façon permanente.

§ 4. On doit considérer et indiquer comme puissance normale des machines et transformateurs, dans le cas du service intermittent, la puissance qui peut être fournie sans interruption pendant une heure, sans que l'augmentation de température dépasse la valeur indiquée ci-dessous comme admissible. Cette puissance doit être indiquée sur une plaque avec la mention « *par intermittences* ».

§ 5. On doit considérer et indiquer comme puissance normale des machines et des transformateurs, pour le cas du service momentané, la puissance qui peut être fournie pendant la durée convenue de fonctionnement, sans que l'augmentation de température dépasse la valeur indiquée ci-dessous comme admissible. Cette puissance doit être indiquée sur une plaque avec la mention « *pour ..... heures* ».

§ 6. On doit considérer et indiquer comme puissance normale des machines et des transformateurs, pour le cas du service continu, la

puissance qui peut être fournie pendant une durée quelconque, sans que l'augmentation de température dépasse la valeur indiquée ci-dessous comme admissible. Cette puissance doit être indiquée sur une plaque, avec la mention « *service continu* ».

§ 7. On peut indiquer simultanément les puissances correspondant à divers régimes.

§ 8. Pour des génératrices et des commutatrices à tension variable, il suffit d'indiquer sur la plaque indicatrice les valeurs normales de la tension, de l'intensité du courant et du nombre de tours; les valeurs limites correspondantes doivent cependant être spécifiées dans les conditions de fourniture.

§ 9. Les machines munies d'un collecteur, lorsque les balais sont convenablement calés et bien rodés, doivent fonctionner à toute charge comprise dans les limites admissibles, avec une production d'étincelles assez réduite pour que l'on ne soit obligé de passer le collecteur au papier de verre ou de faire toute autre opération analogue, qu'après une durée minimum de fonctionnement de 24 heures.

ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE.

§ 10. L'augmentation de température des machines et des transformateurs doit être mesurée à la puissance normale, et en ayant égard aux régimes de fonctionnement définis ci-dessus :

1° Pour le service intermittent, après une marche ininterrompue de 1 heure;

2° Pour le service de courte durée, après une marche ininterrompue égale à celle portée sur la plaque indicatrice de régime;

3° Pour le service continu;

a. Pour les machines après une marche ininterrompue de 10 heures [1];

---

[1] Dans les commentaires, M. Dettmar fait remarquer que pour certaines machines, cette durée n'est pas assez longue, mais que ces machines doivent avoir une telle importance que des conditions spéciales de réception sont à imposer.



b. Pour les transformateurs après une marche ininterrompue d'une durée suffisante pour que la température stationnaire de régime soit atteinte.

§ **11**. Quand il est absolument certain que des machines de faibles dimensions atteignent la température de régime en moins de 10 heures, l'augmentation de température peut être mesurée après une durée de marche réduite en conséquence.

§ **12**. Dans l'essai relatif à la détermination de l'augmentation de température on ne doit ni enlever, ni ouvrir, ni modifier d'une manière importante, les enveloppes, couvercles, parois, etc. prévus pour le fonctionnement en service. On peut cependant, en général, lors de l'essai, établir un système de refroidissement analogue à celui qui a été prévu pour le service et de l'influence duquel on a tenu compte lors de l'établissement de la machine. On ne doit cependant pas établir artificiellement, lors de l'essai des moteurs de tramways, le courant d'air qui est provoqué par la marche.

§ **13**. On adopte, comme température de l'air, celle du courant d'air régnant, ou bien quand il n'y a aucun courant d'air bien caractérisé, la température moyenne de l'air environnant la machine à la hauteur de son milieu. Dans les deux cas on doit mesurer la température à une distance de 1^m environ de la machine. La température de l'air doit être relevée à intervalles réguliers pendant le dernier quart de la durée de l'essai ([1]), et l'on doit prendre comme température de l'air ambiant la moyenne de ces lectures.

§ **14**. Si l'on se sert d'un thermomètre pour la mesure de la température, on doit établir une conduction aussi parfaite que possible de la chaleur entre celui-ci et la partie de la machine où se fait la mesure, par exemple en enveloppant l'appareil de papier d'étain. Afin d'éviter la perte de chaleur, on doit recouvrir la boule du thermomètre et la partie de la machine environnante, d'un corps mauvais

([1]) *Voir* page 41; l'indication des relevés de température pendant le dernier quart d'heure de marche provient d'une erreur de la traduction des normes, parue dans des journaux techniques.

conducteur de la chaleur. (Déchets de coton bien secs ou substances similaires.)

On ne doit faire la lecture que quand le thermomètre cesse de monter.

§ 15. A l'exception des bobines inductrices excitées par du courant continu, et des enroulements fixes, la surélévation de température de toutes les parties des génératrices et des moteurs sera déterminée au moyen de thermomètres.

On doit, dans les mesures thermométriques, autant que possible, choisir les points où la température est maxima et les valeurs de la température ainsi déterminées sont celles à adopter pour la détermination de l'élévation de température.

§ 16. La température des bobines d'inducteurs à courant continu, et de tous les enroulements fixes de génératrices et des moteurs, doit être déterminée par l'augmentation de résistance. Dans ce cas, lorsque le coefficient de température du cuivre n'est pas déterminé pour le cas spécial, on admettra pour la valeur de ce coefficient 0,004.

§ 17. Dans les transformateurs on mesure au thermomètre la température maximum en un point d'ailleurs quelconque des enroulements. Dans les transformateurs à huile, on mesurera la température des couches supérieures de l'huile.

§ 18. Dans les cas ordinaires, et tant que la température de l'air ambiant ne dépasse pas 35° C. *l'augmentation* de température, déterminée comme il est indiqué aux Paragraphes 15 à 17, ne doit pas *dépasser* les valeurs suivantes :

a. Pour les enroulements isolés et les bagues :

Dans le cas d'isolement au coton	50° C.
» » au papier	60° C.
» » au mica, à l'amiante ou avec leurs composés	80° C.

Pour des enroulements fixes, des valeurs de 10 pour 100 supérieures sont admissibles.

b. Pour les collecteurs .... 60° C.

c. Pour le fer des génératrices et des moteurs dans lequel des enroulements sont logés, on admettra les valeurs indiquées en *a*, suivant le genre d'isolement de ces enroulements.

§ **19**. Pour les moteurs de tramways, *l'augmentation* de température déterminée d'après les Paragraphes **15** et **16**, après un fonctionnement ininterrompu de 1 heure à la charge normale, dans la salle des essais, ne doit pas *dépasser :*

a. Pour les enroulements isolés et les bagues :

Dans le cas d'isolement	au coton	70° C.
» »	au papier	80° C.
» »	au mica, à l'amiante ou avec leurs composés	100° C.

Une augmentation de ces limites pour le cas d'enroulements fixes n'est pas admissible.

b. Pour les collecteurs.................................. 80° C.

c. Pour le fer dans lequel des enroulements sont encastrés suivant le genre d'isolant, on admettra les valeurs indiquées en *a*.

§ **20**. Pour des isolants combinés, la limite inférieure doit être adoptée.

§ **21**. Dans les enroulements mis d'une manière permanente en court-circuit, les valeurs limites indiquées ci-dessus peuvent être dépassées.

SURCHARGES.

§ **22**. En service pratique, les surcharges ne doivent se produire que pendant un temps assez court, ou bien lorsque l'état de température des machines ou des transformateurs est tel qu'après cette surcharge l'augmentation admissible de température ne soit pas dépassée. Avec ces restrictions, les machines et les transformateurs doivent pouvoir être surchargés dans les limites suivantes :

Génératrices. Moteurs. Commutatrices.	25 pour 100 pendant une demi-heure, et, dans ce cas, pour les alternateurs, le facteur de puissance ne doit pas être inférieur à celui indiqué sur la plaque de régime.
Moteurs. Commutatrices. Transformateurs.	40 pour 100 pendant 3 minutes, et, dans ce cas, pour les moteurs, on doit maintenir la tension aux bornes à sa valeur normale.

Le collecteur des machines à courant continu et des commutatrices ne doit pas, dans ces conditions, être assez fortement attaqué pour que, ensuite, lorsque l'on revient à la charge normale, les conditions indiquées au § 9 ne soient plus réalisées.

§ **23**. Les génératrices doivent pouvoir, à nombre de tours constant, maintenir la tension constante pour une surcharge pouvant atteindre 15 pour 100. Dans ce cas le facteur de puissance des génératrices à courant alternatif ne doit pas avoir une valeur inférieure à celle spécifiée sur la plaque de régime.

§ **24**. Dans les essais, on doit vérifier la possibilité de surcharges mécaniques et électriques, sans avoir égard à l'augmentation de température; on doit donc commencer l'essai de surcharge quand la machine a une température telle qu'à la fin de l'essai la température admissible ne soit pas dépassée.

§ **25**. Ces prescriptions sont encore valables pour des génératrices à tension variable, dans lesquelles les variations de tension sont obtenues par des variations à peu près proportionnelles du nombre de tours.

Pour des génératrices à nombre de tours à peu près constant (de sorte qu'elles fonctionnent à tension normale avec un champ affaibli) on ne doit pas entreprendre d'essai de surcharge. Il en est de même pour les moteurs qui fonctionnent avec un champ affaibli.

ISOLEMENT.

§ **26**. On ne prescrit pas la mesure de la résistance d'isolement, mais bien un essai de rupture d'isolant (épreuve de percussion) qui doit être effectué au lieu de construction, ou bien, pour de très grands appareils, également avant la mise en service au lieu d'emploi. Les machines et les transformateurs doivent être en état de supporter une telle épreuve avec la surélévation de tension au-dessus de la tension normale indiquée plus loin, appliquée pendant une demi-heure.

L'épreuve doit être faite quand la machine est chaude, et ne doit être renouvelée dans la suite qu'exceptionnellement, afin d'éviter le danger de détérioration.

Les machines et les transformateurs jusqu'à 5000 v. doivent être soumis, dans ces épreuves, à une tension double de la tension de service, qui ne doit cependant pas être inférieure à 100 v.

Les machines et les transformateurs de 5000 à 10000 v. doivent être soumis à une surélévation de tension de 5000 v. A partir de 10000 v. la tension d'épreuve doit être une fois et demie la tension de service.

§ **27**. Ces tensions d'épreuves se rapportent à l'isolement des enroulements par rapport au bâti ainsi qu'à ceux des enroulements séparés électriquement entre eux. Dans ce dernier cas, on doit adopter, comme tension d'épreuve entre des enroulements de tensions différentes, celle qui correspond à la tension la plus élevée.

§ **28**. Deux enroulements reliés électriquement ayant des tensions différentes doivent être soumis, par rapport au bâti, à la tension d'épreuve correspondant à la tension la plus élevée.

§ **29**. Si des machines ou des transformateurs sont placés en série, en plus de l'épreuve prescrite ci-dessus, les enroulements reliés entre eux, doivent être soumis, par rapport à la terre, à une tension d'essai correspondant à la tension totale du système.

§ **30**. Les indications données ci-dessus au sujet de la tension d'essai sont valables à la condition que le courant employé lors de l'essai soit du même genre que celui avec lequel l'enroulement fonctionne en service.

Si un enroulement parcouru en service par du courant continu doit être soumis à l'essai avec du courant alternatif, on ne doit employer que 0,7 fois la tension d'épreuve déterminée d'après les indications données. Si au contraire on essaie avec du courant continu, un enroulement soumis en service à du courant alternatif, la tension d'épreuve doit être 1,4 fois celle déterminée comme il est indiqué ci-dessus [1].

---

[1] Voir à ce sujet, dans les commentaires de M. Desmar, les raisons qui ont amené la Commission à adopter ces valeurs correspondant à des tensions sinusoïdales.

§ 31. Si en service un enroulement est relié électriquement au bâti, cette communication doit être supprimée pendant l'essai d'isolement.

La tension d'essai d'un tel enroulement par rapport au bâti doit être déterminée seulement d'après la valeur de la tension la plus élevée qui peut régner en service entre un point quelconque de l'enroulement et le bâti.

§ 32. Pour les bobines inductrices excitées par une source indépendante, la tension d'épreuve doit être triple de la tension de l'excitatrice et doit atteindre au moins 100 v.

§ 33. L'enroulement de l'induit secondaire des moteurs asynchrones doit être essayé avec une tension double de celle du démarrage, et doit atteindre au moins 100 v. Les induits en court-circuit n'ont pas besoin d'être soumis à l'épreuve.

RENDEMENT.

§ 34. Le rendement d'un appareil quelconque est le rapport de la puissance qu'il fournit à la puissance qu'il absorbe. Il peut être déterminé par la mesure directe des puissances ou indirectement par la mesure des pertes. Les méthodes indirectes sont plus faciles à employer, moins influencées par les erreurs d'observation et, pour ces causes, sont à préférer en règle générale. En indiquant le rendement, on doit mentionner la méthode qui doit être employée pour la mesure, et respectivement la méthode qui a été employée pour la mesure; il suffit pour cela d'indiquer le paragraphe correspondant des présentes normes.

L'indication du rendement doit se rapporter aux conditions d'échauffement correspondant au service normal.

Le rendement doit être indiqué en mentionnant le genre de service (voir § 4, 5, 6).

Le rendement, quand on n'indique pas spécialement la charge, se rapporte à la charge normale.

La puissance nécessaire pour l'excitation perdue dans les rhéostats d'excitation doit entrer en ligne de compte dans les pertes.

§ 35. Pour les génératrices, les moteurs synchrones et les transformateurs le rendement doit être indiqué, en admettant que la tension et le courant sont en phase.

§ 36. Pour les machines avec excitatrices séparées, on doit indiquer séparément les rendements des deux machines.

MÉTHODES POUR LA DÉTERMINATION DU RENDEMENT.

§ 37. *Méthode électrique directe.* — Cette méthode peut être employée pour les moteurs générateurs, les commutatrices et les transformatrices dans lesquels on détermine, par des mesures électriques, la puissance qu'ils débitent et la puissance qu'ils absorbent. Afin de pouvoir employer des instruments de mesure de même espèce, il est à recommander d'essayer chaque fois simultanément deux machines ou deux transformateurs de même sorte.

§ 38. *Méthode électrique indirecte.* — Si l'on a deux machines de même puissance, du même type et de même nature de courant, on les couple mécaniquement et électriquement de manière que l'une fonctionne comme génératrice et l'autre comme moteur.

L'entraînement du système est obtenu par le courant d'une source extérieure, de telle manière que la puissance nécessaire pour compenser les pertes soit seule fournie et mesurée. Les charges des deux machines doivent être réglées de telle manière que la moyenne des puissances absorbée par le moteur et fournie par la génératrice, se rapproche autant que possible de la puissance moyenne des deux machines. Cette moyenne est mesurée. La puissance nécessaire pour compenser les pertes peut être fournie sous forme d'énergie mécanique et mesurée électriquement.

Si l'on ne peut éviter, dans ces mesures, une transmission par courroie on doit faire entrer en ligne de compte les pertes qui en résultent.

La méthode décrite ci-dessus peut encore être employée pour les transformateurs, à la condition que ces derniers soient identiques, au point de vue de la puissance, de la tension et de la fréquence.

On doit naturellement tenir compte au besoin des pertes qui peuvent se produire dans les appareils auxiliaires employés, et cela suivant leur influence.

§ 39. *Méthode directe de freinage.* — Cette méthode est applicable, en général, aux petits moteurs; elle peut encore être employée pour une petite génératrice pouvant fonctionner comme moteur; mais, dans ce cas, on doit s'arranger de manière que les grandeurs magnétiques et mécaniques, le nombre de tours et la puissance s'écartent aussi peu que possible pendant l'essai des valeurs qu'ils ont lors du fonctionnement normal en génératrice.

§ 40. *Méthode indirecte de freinage.* — Si l'on a à sa disposition une génératrice, respectivement un moteur de puissance correspondante, dont le rendement aux diverses charges est exactement connu, celle-ci peut être employée comme frein, respectivement comme moteur pour la commande.

Si l'on doit éventuellement employer une transmission par courroie, on doit faire entrer en ligne de compte la perte due à la transmission.

§ 41. *Méthode du fonctionnement à vide.* — Lors de la marche comme moteur à vide, on détermine la puissance nécessaire au fonctionnement de la machine à vide au nombre de tours par minute normal et avec l'intensité normale du champ. Ladite machine ayant été amenée à la température de régime par une marche en charge préalable.

La puissance fournie représente la perte due au frottement de l'air, des paliers et des balais ainsi qu'à l'hystérésis et aux courants de Foucault, dont la variation avec la charge ne peut être évaluée. On détermine, au moyen de mesures électriques et par le calcul, pour la charge voulue, la perte due à la résistance de l'inducteur, de l'induit, des balais, du contact des balais. Dans cette détermination on doit tenir compte, pour la dernière partie, de l'état de mouvement et de l'intensité réelle, et pour la première partie de la température de la machine.

Pour les moteurs asynchrones, les pertes dans l'enroulement secondaire peuvent être déterminées au moyen de la mesure du glissement au lieu de la mesure de la résistance. On doit tenir compte d'une perte éventuelle à charge normale dans un rhéostat de réglage de l'enroulement inducteur.

Cette méthode est naturellement applicable aux transformateurs en la modifiant en conséquence.

La somme des pertes énumérées ci-dessus est désignée sous le nom de *perte mesurable*. On considère comme rendement le rapport de la puissance disponible à la somme de cette puissance et de la *perte mesurable*.

§ 42. *Méthode du moteur auxiliaire.* — Si, dans certains cas, la détermination de la perte par frottement de l'air, des paliers et des balais, ainsi que par hystérésis et courants de Foucault, offre des difficultés, ou bien, si l'on n'a pas à sa disposition du courant de la nature de celui nécessaire à la machine à essayer, on peut déterminer la perte par frottement de l'air, des paliers et des balais, ainsi que par hystérésis et courants de Foucault, au moyen d'un moteur auxiliaire.

La détermination de la perte par frottements de l'air des paliers et des balais, ainsi que par hystérésis et courants de Foucault, de la machine à essayer doit être faite en mesurant la puissance fournie au moteur auxiliaire pour entraîner la machine à essayer, normalement excitée, et en retranchant la perte dans le moteur auxiliaire et éventuellement dans la transmission par courroie.

Les pertes dans le moteur auxiliaire se déterminent en le faisant fonctionner à vide, au même nombre de tours et sous la même tension que lors du premier essai; et en déterminant comme il a été indiqué au § 41 les pertes dues à la charge, dans les résistances des bobines inductrices de l'induit des balais et du contact des balais. Pour le surplus on doit procéder pour la machine à essayer exactement comme il est indiqué au § 41, et le rendement est défini de la même manière.

On peut employer comme moteur auxiliaire la machine à vapeur, actionnant la dynamo, si elle peut être découplée.

On doit alors entreprendre l'essai de la manière suivante :

On mesure la puissance indiquée de la machine à vapeur commandant la génératrice à vide, au nombre de tours normal et l'excitation normale, et l'on recommence l'essai en désembrayant la dynamo. La différence entre les deux puissances indiquées représente la perte par frottement de l'air, des paliers, des balais, ainsi que par hystérésis et courants de Foucault. On doit, éventuellement, tenir compte de la puissance absorbée par l'excitation, si elle est également commandée par le moteur à vapeur. Cette méthode doit être employée

avec des précautions particulières, vu les inexactitudes inhérentes aux diagrammes relevés lors du fonctionnement à faible charge d'un moteur à vapeur.

§ 43. *Méthode de l'indicateur.* — Quand la génératrice est commandée directement par un moteur à vapeur et ne peut être découplée, on doit déterminer le rendement sans tenir compte des frottements. La perte par hystérésis et par courants de Foucault dans le fonctionnement à vide, au nombre de tours normal et avec l'excitation normale, doit être déterminée au moyen des diagrammes de la machine à vapeur, en relevant ces derniers sur la machine actionnant la génératrice excitée, puis non excitée. Si l'excitation est commandée par la même machine à vapeur, on doit déduire la puissance correspondante absorbée. La différence sera considérée comme perte par hystérésis et courants de Foucault à vide, dont la variation avec la charge ne peut être estimée.

Au moyen de mesures électriques et du calcul, on détermine la perte en charge due à la résistance des bobines inductrices, de l'induit, des balais et du contact de ces derniers, en tenant compte, dans l'estimation de cette dernière partie, de la perte due à l'état de mouvement et de l'intensité réelle du courant et, dans l'estimation des premières parties, de la température de la machine. Une perte éventuelle dans un rhéostat intercalé lors du fonctionnement à charge normale dans l'excitation doit entrer en ligne de compte. La somme des pertes indiquées ci-dessus est à considérer comme *perte mesurable*. Le rendement sera désigné comme étant le rapport de la puissance débitée à la somme de cette puissance et de la *perte mesurable*. Par suite de l'inexactitude des diagrammes relevés pendant le fonctionnement à faible charge d'une machine à vapeur, cette méthode doit être employée avec des précautions particulières.

§ 44. *Méthode des pertes séparées.* — Pour des machines qui ne peuvent fonctionner qu'avec des paliers n'en faisant pas partie, on doit déterminer le rendement sans avoir égard aux frottements de la manière suivante :

La perte par hystérésis et courants de Foucault se détermine électriquement en faisant fonctionner la machine comme moteur d'une manière analogue à celle indiquée dans la méthode du fonctionne-

ment à vide. Afin de pouvoir séparer la perte par frottements de l'air des paliers et des balais de la perte par hystérésis et courants de Foucault, on doit procéder de la manière suivante :

On fait fonctionner la machine comme moteur à vide au nombre de tours normal, sous plusieurs tensions différentes, en prenant la tension aussi faible que possible, en procédant aussi à des mesures à la tension normale, et également, si c'est possible, à une tension de 25 pour 100 plus élevée. On rapporte graphiquement les valeurs relevées, et la courbe ainsi obtenue doit être prolongée de manière à pouvoir déterminer la perte correspondant à une tension *nulle*. Cette valeur donne la perte par frottements et doit être retranchée de la perte à vide déterminée lors du fonctionnement à vide sous la tension normale. Le reste est à considérer comme perte par hystérésis et courants de Foucault, dont la variation avec la charge ne peut être déterminée. On détermine électriquement les autres pertes comme il est indiqué au § 41.

La somme de la perte par hystérésis et courants de Foucault, ainsi que des pertes en charge par suite de la résistance des bobines inductrices, de l'induit des balais, du contact de ces derniers, sera désignée sous le nom de *perte mesurable*, et le rendement sera considéré comme le rapport de la puissance débitée à la somme de cette puissance et de la *perte mesurable*.

La détermination des pertes par hystérésis et courants de Foucault peut également se faire au moyen d'un moteur auxiliaire.

VARIATION DE TENSION.

§ 45. Sous la désignation de variation de tension d'une génératrice à courant alternatif, on doit comprendre la variation de la tension, que l'on observe quand, la machine fonctionnant à la tension normale avec le courant d'intensité maximum indiqué sur la plaque, on coupe le courant sans changer ni le nombre de tours ni l'intensité du courant d'excitation.

§ 46. Pour les machines qui sont destinées à fonctionner uniquement à charge non inductive, l'indication de la variation de tension pour cette dernière suffit. Pour les machines qui doivent fonctionner avec des charges inductives, outre la variation pour charge non

inductive, on doit encore indiquer la variation de tension pour une charge inductive avec facteur de puissance égal à 0,8. On peut en outre également indiquer la variation de tension pour d'autres facteurs de puissance.

§ 47. Si l'on doit essayer des machines à courant continu au point de vue de la variation de tension, on doit s'en référer à ce qui suit : les machines à courant continu, avec excitation en dérivation, avec excitation compound, ou avec excitation séparée, seront essayées sans que l'on touche à l'excitation (celle-ci étant réglée une fois pour toutes pour la tension normale à pleine charge), depuis la pleine charge jusqu'au fonctionnement à vide, le nombre de tours restant constant, les relevés se feront au moins pour quatre charges, avec chaque fois réduction à peu près égale de la charge. La différence entre la tension maximum et la tension minimum observée donne la variation de tension. Au point de vue du calage des balais, on doit s'en rapporter aux conditions qui auront été convenues.

§ 48. Pour les transformateurs, on doit indiquer non seulement la chute ohmique de tension, mais aussi la tension en court-circuit correspondant à l'intensité normale, les deux étant rapportées au circuit secondaire. La chute de tension ohmique est considérée comme variation de tension dans le cas de charge non inductive; la tension de court-circuit, comme variation de tension dans le cas de charge inductive.

Il est admissible de procéder à l'essai en employant une intensité de courant ne différant pas sensiblement de la valeur normale; les variations de tension doivent être ensuite calculées proportionnellement à la valeur normale de l'intensité.

ANNEXE.

Il est recommandé, pour l'étude d'installations nouvelles ainsi que dans l'établissement de séries de prix, d'adopter autant que possible les valeurs indiquées ci-dessous pour la fréquence, le nombre de tours et la tension.

La *fréquence* doit être 25 ou 50.

Le *nombre de tours*, pour le cas de machines à courants alter-



natifs ou à courants triphasés, doit correspondre aux indications du Tableau suivant :

Nombre de pôles.	Nombre de tours des génératrices, moteurs synchrones ou moteurs asynchrones à vide pour la fréquence de : 25.	50.
2	1500	3000
4	750	1500
6	500	1000
8	375	750
10	300	600
12	250	500
16	187,5	375
20	150	300
24	125	250
28	107	214
32	94	188
36	83	166
40	75	150
48		125
56		107
64		94
72		83
80		75

La *tension* doit correspondre aux indications du Tableau suivant :

a. Courant continu.		*b*. Courant alternatif, respectivement courants triphasés.	
Moteurs.	Génératrices.	Moteurs ou bornes primaires des transformateurs.	Génératrices ou bornes secondaires des transformateurs.
110	115	110	115
220	230	220	230
440	470	500	525
500	550	1000	1050
		2000	2100
		3000	3150
		5000	5250

Pour les génératrices à courant continu pour tension variable (à l'exception des survolteurs), on doit prendre en considération les observations suivantes :

A. *Pour l'augmentation de la tension.*

Quand une génératrice à courant continu, à nombre de tours constant, doit pouvoir donner une tension plus élevée que la tension normale, ceci peut être réalisé en augmentant l'excitation, en tant que la puissance n'en est pas accrue. En général, cette surélévation de tension ne doit pas être supérieure à 30 pour 100 de la tension normale. Une surélévation plus grande de la tension doit être obtenue en augmentant le nombre de tours.

B. *Pour la diminution de la tension.*

Quand une génératrice à courant continu, à nombre de tours con stant, doit donner une tension moindre que la normale, ceci peut être réalisé en diminuant l'excitation, en tant que la puissance est diminuée dans les mêmes proportions que la tension. En général, cette diminution de tension ne doit pas être supérieure à 20 pour 100 de la tension normale. Une diminution plus grande de la tension doit être obtenue en diminuant le nombre de tours.

C. *Pour l'augmentation et la diminution de la tension d'une même machine.*

Quand une génératrice à nômbre de tours constant doit pouvoir fournir par instants une tension moindre ou une tension supérieure à la tension normale, cela peut avoir lieu en faisant varier l'excitation, en tant que pour l'augmentation de tension, la puissance et, pour la diminution de tension, l'intensité du courant ne soient pas augmentées ; et que la différence entre la tension maximum et la tension minimum ne dépasse pas 45 pour 100 de cette dernière. Une variation plus grande de tension doit être obtenue en faisant varier le nombre de tours. Si l'on exige une génératrice à courant continu pour tension variable, cette condition doit être exprimée formellement dans la commande.

Règlement de l'Association française des propriétaires d'appareils à vapeur.

Les *règles pour les offres, la fourniture et les essais de machines électriques* données ci-dessous ont été adoptées pour une durée provisoire d'un an par les associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur ayant un service électrique.

DÉSIGNATION DE LA PUISSANCE NOMINALE.

§ 1. La puissance nominale est la puissance qu'une machine est capable de débiter normalement. Si cette puissance débitée est électrique, elle sera indiquée aux bornes : en kilowatts dans le cas de courants continus, et en kilovolt-ampères dans le cas de courants alternatifs; si cette puissance est mécanique, elle sera exprimée en chevaux de 75^{kgm} par seconde.

§ 2. Si, avec la puissance débitée par une génératrice à courants alternatifs, il est donné une indication sur la puissance absorbée en chevaux, cette indication se rapportera à un facteur de puissance correspondant à la destination de la machine, et, sauf convention spéciale, ce facteur sera pris égal à 0,8.

§ 3. Quand une machine ou un appareil présente par lui-même un décalage de phase entre la tension et le courant, comme par exemple les moteurs d'induction, ce facteur de puissance est à indiquer au moins pour la pleine charge.

LIMITATION DE LA PUISSANCE NOMINALE.

§ 4. La puissance nominale est limitée par : 1° *l'échauffement;* 2° *l'auto-régulation;* 3° *le rendement;* 4° *les surcharges.*

ÉCHAUFFEMENT.

§ 5. L'échauffement d'une machine électrique doit être avant tout compatible avec la conservation en parfait état de l'isolant.

§ 6. Les limites maxima admises pour la surélévation de température mesurées dans les conditions et après une durée d'essai spécifiées dans les paragraphes suivants sont :

a. Pour les circuits électriques ainsi que pour les bagues et collecteurs isolés au carton (l'isolement au carton n'est admis que pour les tensions inférieures à 100 volts)...................... 45°
b. Pour les collecteurs et les bagues isolés au mica ou ses dérivés, et les balais.. 55°
c. Pour les circuits toujours fermés sur eux-mêmes....... 60°
d. Pour les paliers, bornes, connexions, etc............. 40°

Pour les machines à collecteur destinées à un service continu de jour et de nuit, ces limites seront abaissées de 5°.

§ 7. Ces limites d'échauffement supposent une température ambiante ne dépassant pas 35°. Si la température ambiante varie pendant la durée de l'essai, on prendra comme valeur celle du milieu du temps d'essai; le thermomètre indiquant cette température ambiante sera placé à hauteur de l'axe de la machine.

§ 8. Les machines en essai seront autant que possible dans les conditions normales de fonctionnement et de ventilation.

Cependant, dans le cas d'alternateurs et de moteurs synchrones, la charge sera faite en kilovolt-ampères avec un facteur de puissance quelconque pouvant varier de 1 à 0,5, et dans tous les cas les circuits inducteurs et l'excitatrice devront y suffire en restant dans les limites d'échauffement ci-dessus.

§ 9. Sauf spécifications contraires, la durée de l'essai à pleine charge après laquelle on mesurera la surélévation de température sera déterminée pour les machines par le tableau ci-après :

$K = \left(\frac{\text{volt-ampères}}{\text{tours par minute}}\right)$.	Durée de l'essai.
	heures
0 à 5	3
5 à 10	4
10 à 30	5
30 à 100	6
100 à 200	7

$K = \left(\dfrac{\text{volts-ampères}}{\text{tours par minute}}\right)$.	Durée de l'essai.
	heures
200 à 300	8
300 à 500	9
500 à 700	10
750 à 1000	11
1000 et au-dessus (1)	12

§ 10. Pour les transformateurs, la durée de l'essai sera celle du fonctionnement; on peut ainsi distinguer :

a. Transformateurs à service discontinu (distribution de force de jour) : durée de l'essai en pleine charge égale à la période de fonctionnement;

b. Transformateurs toujours sous tension et à charge discontinue (distribution d'éclairage) : durée de l'essai en pleine charge égale à la période de fonctionnement en charge, après limite d'échauffement atteinte sous tension;

c. Transformateurs à charge continue : durée de l'essai jusqu'à obtention de l'échauffement limite en pleine charge.

§ 11. La température des enroulements sera déterminée autant que possible par augmentation de résistance et par application du thermomètre : on prendra toujours la plus élevée des valeurs trouvées. Pour déduire la surélévation de température de la différence de résistance, on ramènera les résistances mesurées à 0°, en admettant comme coefficient de température la valeur constante de 0,004.

AUTO-RÉGULATION.

§ 12. Le coefficient de régularité de tension et de vitesse est défini par le rapport des variations de tension ou de vitesse aux tensions et vitesses à pleine charge.

§ 13. La variation de tension pour les génératrices sera obtenue

(1) Pour les machines à collecteur dont le coefficient K est supérieur à 1500 ou 2000, il y aura quelquefois lieu de convenir d'une durée d'essai supérieure à 12 heures, suivant la destination de la machine. Pour les machines et moteurs à courants alternatifs de grandes dimensions, une durée d'essai de 12 heures suffira en général.



en passant de la marche à pleine charge à la marche à vide, à vitesse constante :

a. Pour les machines auto-excitatrices à courant continu en maintenant constante la résistance dans le circuit inducteur dérivé ;

b. Pour les génératrices à courant continu à excitation séparée et pour les génératrices à courants alternatifs en maintenant constant le courant d'excitation.

Pour les machines à courant continu, la position des balais sera maintenue fixe et à la position de la pleine charge, à moins de conventions contraires.

§ **14.** La variation de vitesse pour les réceptrices s'obtiendra de même en passant de la marche en charge à la marche à vide en maintenant constantes aux bornes : la tension pour le courant continu, et pour les courants alternatifs la tension et la fréquence. Pour les moteurs d'induction, l'indication du coefficient de régularité est souvent remplacée par celle du glissement, qui en diffère légèrement, et se définit par le rapport de la variation de vitesse à la vitesse du synchronisme.

§ **15.** Pour les transformateurs, le coefficient de régularité s'obtiendra en passant de la pleine charge à charge nulle au secondaire à fréquence et tension constantes au primaire.

§ **16.** Pour les commutatrices et moteurs-générateurs, on fera varier la charge débitée de la valeur nominale à o, en maintenant tension et fréquence constantes aux bornes réceptrices.

§ **17.** Pour les génératrices à courants alternatifs et les transformateurs, la variation de tension sera spécifiée pour la puissance nominale (en KVA) :

a. Avec un facteur de puissance égal à l'unité ;

b. Avec un facteur de puissance correspondant à la destination de l'appareil, et, sauf conventions spéciales, ce facteur sera pris égal à o,8.

§ **18.** Pour les génératrices et les transformateurs, la variation de



tension sera spécifiée par le constructeur; dans le cas où cette spécification ferait défaut, on admettra comme limite raisonnable (sauf quelques cas spéciaux, tels que les machines d'électrométallurgie) :

a. Pour les génératrices à courant continu excitées en dérivation, de 8 à 12 pour 100 suivant les dimensions de la machine;

b. Pour les génératrices à courants alternatifs, 6 pour 100 dans le cas de facteur de puissance égal à l'unité, 20 pour 100 dans le cas de facteur de puissance = 0,8;

c. Pour les transformateurs, 1 et 4 pour 100 [1] dans les mêmes conditions que ci-dessus (sous *b*); dans ce dernier cas, on pourra appliquer pour la mesure soit la méthode directe, soit la méthode indirecte dite *du court-circuit*.

RENDEMENT.

§ **19.** Le rendement d'un appareil est le rapport

$$\frac{\text{Puissance utilisable}}{\text{Puissance absorbée}};$$

ceci est le rendement industriel ou simplement rendement qui peut encore se définir par les rapports

$$\frac{\text{Puissance utilisable}}{\text{Puissance utilisable} + \text{pertes totales}},$$

ou

$$\frac{\text{Puissance absorbée} - \text{pertes totales}}{\text{Puissance absorbée}}.$$

Nous appellerons rendement électrique la valeur définie par le rapport

$$\frac{\text{Puissance utilisable}}{\text{Puissance utilisable} + \text{pertes électriques}}.$$

§ **20.** Ces définitions montrent que le rendement peut être déterminé de deux façons : soit directement par la mesure des puissances utilisable et absorbée, soit indirectement par la mesure d'une de ces puissances et des pertes.

Les méthodes indirectes sont plus faciles à réaliser et les erreurs

---

[1] Pour les puissances supérieures à 10 kilovolt-ampères.

influencent moins les résultats : en général, leur emploi est donc préférable. Cependant, il est à remarquer que les pertes (indiquées § 22) ne sont pas intégralement mesurables, il y a donc lieu de distinguer pour chacun des rendements industriel et électrique le rendement vrai défini § 19 et le rendement mesurable qui sera défini.

a. Rendement industriel mesurable :

$$\frac{\text{Puissance utilisable}}{\text{Puissance utilisable} + \text{pertes totales mesurables}};$$

b. Rendement électrique mesurable :

$$\frac{\text{Puissance utilisable}}{\text{Puissance utilisable} + \text{pertes électriques mesurables}}.$$

§ 21. Toute spécification de rendement devra se rapporter à une au moins des définitions précédentes, à savoir :

Rendement industriel; rendement industriel mesurable; rendement électrique; rendement électrique mesurable; et s'adapter aux conditions possibles de l'essai. Dans ce but également, le constructeur donnera le détail des différentes pertes.

§ 22. Ces pertes se décomposent comme suit :

Pertes mécaniques :

a. Frottement des paliers et ventilation;

b. Frottement des balais sur les collecteurs et bagues.

Pertes électriques :

c. Hystérésis et courants de Foucault;

d. Effet Joule dans tous les enroulements (à détailler : excitation, induit, enroulements primaire et secondaire);

e. Résistance de contact des balais.

§ 23. Les chiffres donnés pour le rendement s'entendent, sauf indications contraires, pour la pleine charge, et en y comprenant les pertes dues aux appareils auxiliaires, tels que : rhéostat, excitatrice, ventilateurs, etc. (1).

(1) Dans le cas où ces appareils auxiliaires auraient en plus une autre destination, on imputera à la machine considérée sa part proportionnelle de puissance absorbée par l'appareil auxiliaire, ou on indiquera séparément les rendements de la machine principale et des appareils auxiliaires.

Pour les génératrices à courants alternatifs, le rendement sera indiqué à la pleine charge en kilovolt-ampères :

a. Avec un facteur de puissance égal à l'unité;

b. Avec un facteur de puissance égal à o,8.

§ **24**. Il est entendu que les mesures devront être faites ou ramenées à la température atteinte après le fonctionnement défini § 9.

De même, la détermination des pertes à vide se fera à la vitesse constante de régime et à la tension normale augmentée ou diminuée de la perte ohmique; pour les machines à collecteur, la position des balais ne différera de la position à pleine charge que dans la mesure nécessaire pour éviter les étincelles.

SURCHARGES.

§ **26**. Toute machine doit pouvoir supporter sans détérioration (et sans étincelles nuisibles pour les machines à collecteur) une surcharge de puissance de :

a. 25 pour 100 pendant une demi-heure, pour toutes les machines (génératrices, moteurs et transformateurs);

b. 40 pour 100 pendant 3 minutes pour tous les moteurs et les transformateurs.

Ces surcharges seront fournies après l'essai en pleine charge défini § 8 ou à la température atteinte après cet essai.

§ **27**. Pour toutes génératrices à courants continus ou alternatifs, il devra être possible de maintenir la tension de régime pendant toute la durée de la surcharge, à la vitesse normale.

Pour les alternateurs, cette surcharge s'entend en kilovolt-ampères avec facteur de puissance = o,8, l'excitatrice devra pouvoir y suffire.

§ **28**. En plus des surcharges de puissance spécifiées ci-dessus, les machines devront pouvoir supporter un surcroît de vitesse qui, pour les génératrices, sera à fixer dans chaque cas en tenant compte du mode de commande.

Les moteurs à courant continu supporteront pendant 5 minutes une vitesse double de la normale.

ISOLEMENT.

§ 29. Les machines d'une tension inférieure à 400 volts devront présenter une résistance d'isolement au moins égale à $R = 5000\,V$ (R étant exprimé en ohms et V étant la tension normale en volts). A partir de 400 volts, toutes les machines auront au moins une résistance d'isolement de 2 mégohms. Cette condition doit être remplie, à chaud et à froid, aussi bien chez le constructeur qu'après la mise en route.

ESSAIS DE SURTENSION.

§ 30. En outre, toutes les machines et les transformateurs devront pouvoir supporter pendant 5 minutes l'application d'une tension d'essai donnée par le tableau suivant :

Tension normale.		Tension d'essai ([1]).
Jusqu'à	3000 volts	le double de la tension normale (minimum 100 volts).
»	4000	7500 volts
»	5000	8800
»	6000	10200
»	7000	11700
	8000	13300
	9000	14800
»	10000	16300
»	12000	19300
»	15000	24000
»	20000	31000
»	25000	38000
»	30000	45000

La tension d'essai (autant que possible de même nature que le courant de la machine) sera appliquée entre les enroulements et la masse et entre les enroulements qui ne sont pas en relation électrique ([2]).

([1]) Les valeurs de ce Tableau ont été déterminées (à partir de 5000 volts) par la condition que les distances explosives des tensions d'essai soient doubles de celles des tensions de régime.

([2]) Quand un point de l'enroulement est relié en permanence au bâti, cette connexion devra naturellement être défaite pour l'essai, mais la tension d'essai se calculera dans ce cas d'après la tension maxima qui peut exister entre un point de l'enroulement et la masse.

L'essai de surtension ne sera exigé qu'à la réception, mais pourra être fait à chaud ou à froid.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION.

§ 31. Sauf indications contraires, toutes les machines seront munies de paliers graisseurs automatiques, tels que ceux à bagues ou à chaînes, avec indicateur de niveau d'huile. Pour les machines à collecteur fonctionnant sous une tension supérieure à 100 volts, les frotteurs seront constitués par les blocs de charbon et l'isolement des lames du collecteur par une substance non hygrométrique et incombustible.

Les moteurs d'induction à bagues, sauf exception pour les moteurs à démarrages fréquents et à réglage de vitesse (tels que grues, ponts roulants, etc.), seront munis d'un dispositif permettant de mettre l'enroulement secondaire en court-circuit et de relever les balais.

TOLÉRANCES POUR LES GARANTIES.

§ 32. Comme sanction aux diverses garanties données, il est d'usage de fixer deux limites dont la première représente la tolérance accordée pour tenir compte des inexactitudes et erreurs de mesures, et dont la seconde donne à l'acheteur le droit de refuser le matériel. Entre les deux limites, on convient généralement d'une pénalité proportionnelle à l'écart.

§ 33. Les valeurs suivantes sont à recommander pour les limites mentionnées ci-dessus :

Garanties :	Tolérances pour les mesures.	Limites de refus.
d'échauffement......	4° C. au-dessus des limites fixées au § 6..............	10° C au-dessus des limites du § 6.
de chute de tension.	15 % du pourcentage garanti par le constructeur	50 % du pourcentage garanti.
de rendement.......	15 % de la somme des pertes totales ou mesurables suivant le cas..............	50 pour 100 des pertes totales ou mesurables.

TABLE N° 1.

VALEURS DE $a^{\frac{1}{2}}$, $a^{\frac{3}{2}}$, $a^{1,6}$ ET a^2.

a.	$a^{\frac{1}{2}}$.	$a^{\frac{3}{2}}$.	$a^{1,6}$.	a^2.	a.	$a^{\frac{1}{2}}$.	$a^{\frac{3}{2}}$.	$a^{1,6}$.	a^2.	a.	$a^{\frac{1}{2}}$.	$a^{\frac{3}{2}}$.	$a^{1,6}$.	a^2.
0,1	0,32	0,03	0,03	0,01	3,4	1,84	6,27	7,09	11,56	6,7	2,59	17,35	20,98	44,89
0,2	0,45	0,08	0,08	0,04	3,5	1,87	6,55	7,42	12,25	6,8	2,61	17,73	21,48	46,24
0,3	0,55	0,16	0,15	0,09	3,6	1,90	6,83	7,76	12,96	6,9	2,63	18,12	21,99	47,61
0,4	0,63	0,25	0,23	0,16	3,7	1,92	7,12	8,11	13,69	7,0	2,65	18,52	22,50	49,00
0,5	0,71	0,35	0,33	0,25	3,8	1,95	7,41	8,47	14,44	7,1	2,66	18,92	23,01	50,41
0,6	0,77	0,46	0,44	0,36	3,9	1,97	7,70	8,83	15,21	7,2	2,68	19,32	23,53	51,84
0,7	0,84	0,58	0,56	0,49	4,0	2,00	8,00	9,19	16,00	7,3	2,70	19,72	24,06	53,29
0,8	0,89	0,72	0,70	0,64	4,1	2,02	8,30	9,56	16,81	7,4	2,72	20,13	24,59	54,76
0,9	0,95	0,85	0,84	0,81	4,2	2,05	8,61	9,93	17,64	7,5	2,74	20,54	25,13	56,25
1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	4,3	2,07	8,92	10,32	18,49	7,6	2,76	20,95	25,66	57,76
1,1	1,05	1,15	1,17	1,21	4,4	2,10	9,23	10,71	19,36	7,7	2,77	21,37	26,21	59,29
1,2	1,10	1,31	1,34	1,44	4,5	2,12	9,55	11,10	20,25	7,8	2,79	21,78	26,75	60,84
1,3	1,14	1,48	1,52	1,69	4,6	2,14	9,87	11,50	21,16	7,9	2,81	22,13	27,21	62,41
1,4	1,18	1,66	1,71	1,96	4,7	2,17	10,19	11,89	22,09	8,0	2,83	22,63	27,86	64,00
1,5	1,22	1,84	1,91	2,25	4,8	2,19	10,52	12,30	23,04	8,1	2,85	23,05	28,42	65,61
1,6	1,26	2,02	2,12	2,56	4,9	2,21	10,85	12,72	24,01	8,2	2,86	23,45	28,98	67,24
1,7	1,30	2,22	2,34	2,89	5,0	2,24	11,18	13,14	25,00	8,3	2,88	23,91	29,55	68,89
1,8	1,34	2,42	2,56	3,24	5,1	2,26	11,53	13,57	26,01	8,4	2,90	24,35	30,12	70,56
1,9	1,38	2,62	2,79	3,61	5,2	2,28	11,86	13,98	27,04	8,5	2,92	24,78	30,69	72,15
2,0	1,41	2,83	3,03	4,00	5,3	2,30	12,20	14,41	28,09	8,6	2,93	25,22	31,27	73,96
2,1	1,45	3,04	3,28	4,41	5,4	2,32	12,55	14,85	29,16	8,7	2,95	25,66	31,86	75,69
2,2	1,48	3,26	3,53	4,84	5,5	2,35	12,90	15,30	30,25	8,8	2,97	26,11	32,45	77,44
2,3	1,52	3,49	3,79	5,29	5,6	2,37	13.25	15,75	31,36	8,9	2,98	26,55	33,04	79,21
2,4	1,55	3,72	4,06	5,76	5,7	2,39	13,61	16,20	32,49	9,0	3,00	27,00	33,63	81,00
2,5	1,58	3,95	4,33	6,25	5,8	2,41	13,97	16,65	33,64	9,1	3,02	27,45	34,23	82,81
2,6	1,61	4,19	4,61	6,76	5,9	2,43	14,33	17,12	34,81	9,2	3,03	27,91	34,84	84,64
2,7	1,64	4,44	4,90	7,29	6,0	2,45	14,70	17,58	36,00	9,3	3,05	28,36	35,45	86,49
2,8	1,67	4,69	5,19	7,84	6,1	2,47	15,06	18,05	37,21	9,4	3,07	28,82	36,06	88,36
2,9	1,70	4,94	5,49	8,41	6,2	2,49	15,44	18,53	38,44	9,5	3,08	29,28	36,67	90,25
3,0	1,73	5,20	5,80	9,00	6,3	2,51	15,81	19,00	39,69	9,6	3,10	29,74	37,28	92,16
3,1	1,76	5,46	6,11	9,61	6,4	2,53	16,19	19,49	40,96	9,7	3,11	30,21	37,92	94,09
3,2	1,79	5,73	6,43	10,24	6,5	2,55	16,57	19,98	42,25	9,8	3,13	30,68	38,54	96,04
3,3	1,82	5,99	6,76	10,89	6,6	2,57	16,98	20,50	43,56	9,9	3,15	31,15	39,17	98,01
″	″	″	″	″	″	″	″	″	″	10	3.16	31,63	39,81	100,00

TABLE N° 2.

TRANSFORMATION DE LA TENSION ÉTOILÉE DE COURANTS TRIPHASÉS EN TENSION COMPOSÉE.

TENSION		TENSION		TENSION		TENSION	
étoilée.	composée.	étoilée.	composée.	étoilée.	composée.	étoilée.	composée.
1	1,73	40	69,28	700	1212,47	10000	17321
2	3,46	50	86,61	800	1385,68	20000	34642
3	5,20	60	103,93	900	1558,89	30000	51963
4	6,93	70	121,25	1000	1732,1	40000	69284
5	8,66	80	138,57	2000	3464,2	50000	86605
6	10,39	90	155,89	3000	5196,3	60000	103926
7	12,12	100	173,21	4000	6928,4	70000	121247
8	13,86	200	346,42	5000	8660,5	80000	138568
9	15,59	300	519,63	6000	10329,6	90000	155889
10	17,32	400	692,84	7000	12124,7	″	″
20	34,64	500	866,05	8000	13856,8	″	″
30	51,96	600	1039,26	9000	15588,9	″	″

TABLE N° 3.

TRANSFORMATION DE LA TENSION COMPOSÉE DE COURANTS TRIPHASÉS EN TENSION ÉTOILÉE.

TENSION		TENSION		TENSION		TENSION	
composée.	étoilée.	composée.	étoilée.	composée.	étoilée.	composée.	étoilée.
1	0,58	30	17,32	500	288,67	7000	4041,4
2	1,15	40	23,09	600	346,40	8000	4618,7
3	1,73	50	28,87	700	404,14	9000	5196,0
4	2,31	60	34,64	800	461,87	10000	5773
5	2,89	70	40,41	900	519,60	20000	11547
6	3,46	80	46,19	1000	577,3	30000	17320
7	4,04	90	51,96	2000	1154,7	40000	23094
8	4,62	100	57,73	3000	1732,0	50000	28867
9	5,20	200	115,47	4000	2309,4	60000	34640
10	5,77	300	173,20	5000	2886,7	70000	40414
20	11,64	400	230,94	6000	3464,0	80000	46187
″	″	″	″	″	″	90000	51960

TABLE N° 4.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE, EN FONCTION DE LA PRESSION EN KILOGRAMMES INDIQUÉE PAR LE MANOMÈTRE.

PRESSION en kilogrammes.	TEMPÉRATURE.	PRESSION en kilogrammes.	TEMPÉRATURE.	PRESSION en kilogrammes.	TEMPÉRATURE.
4,0	151,2	7,4	171,7	10,8	186,4
4,1	152,0	7,5	172,3	10,9	186,8
4,2	152,7	7,6	172,8	11,0	187,1
4,3	153,5	7,7	173,3	11,1	185,5
4,4	154,3	7,8	173,8	11,2	187,9
4,5	155,0	7,9	174,3	11,3	188,3
4,6	155,7	8,0	174,8	11,4	188,7
4,7	156,4	8,1	175,3	11,5	189,1
4,8	157,0	8,2	175,7	11,6	189,4
4,9	157,7	8,3	176,2	11,7	189,8
5,0	158,3	8,4	176,6	11,8	190,1
5,1	158,9	8,5	177,1	11,9	190,5
5,2	159,5	8,6	177,5	12,0	190,9
5,3	160,1	8,7	177,9	12,1	191,3
5,4	160,7	8,8	178,3	12,2	191,6
5,5	161,4	8,9	178,8	12,3	//
5,6	162,0	9,0	179,2	12,4	192,2
5,7	162,6	9,1	179,6	12,5	192,5
5,8	163,1	9,2	180,0	12,6	192,8
5,9	163,7	9,3	180,4	12,7	193,2
6,0	164,3	9,4	180,8	12,8	193,5
6,1	164,8	9,5	181,2	12,9	193,8
6,2	165,3	9,6	181,6	13,0	194,1
6,3	165,9	9,7	182,0	13,1	194,5
6,4	166,5	9,8	182,4	13,2	194,8
6,5	167,1	9,9	182,8	13,3	195,2
6,6	167,6	10,0	183,2	13,4	195,5
6,7	168,2	10,1	183,6	13,5	195,9
6,8	168,7	10,2	184,0	13,6	196,2
6,9	169,2	10,3	184,4	13,7	196,5
7,0	169,7	10,4	184,8	13,8	196,7
7,1	170,2	10,5	185,2	13,9	197,0
7,2	170,7	10,6	185,6	14,0	197,2
7,3	171,2	10,7	187,0	//	//

MODÈLES DE FEUILLES D'ESSAIS.

N° 1. — *Caractéristique à vide d'une dynamo à courant continu.*

Essai du ....

Génératrice N°....., 40 a, 110 v.
t/m normal 1150.

Nos des relevés.	T/M N_1.	COURANT d'excitation.		F. E. M. aux bornes.		F. E. M. au t/m normal $\frac{NE}{N_1}$.	OBSERVATIONS.
		Lectures.	Ampères.	Lectures.	Volts E.		
1	1125	0	0	19	3,8	3,9	A. m. 100 div. = 1 a.
2	1150	4	0,04	50	10,0	10,0	V. m. 150 div. = 30 v.

N° 2. — *Caractéristique en charge d'une génératrice à courant continu à excitation indépendante.*

Essai du ....

Dynamo N° ....., 40 a, 110 v.
t/m normal 1150.
Intensité du courant d'excitation (constante) 0,72 a.

Nos des relevés.	T/M.	INTENSITÉ du courant dans le circuit extérieur.		D. D. P. aux bornes.		D. D. P. au t/m normal.	OBSERVATIONS.
		Lectures.	Ampères.	Lectures.	Volts.		
1	1150	0	0	110	110,0	110,0	A. m. 100 div. = 10 a.
2	1150	30	3,0	108	109,0	109,0	V. m. 150 div. = 150 v.
3	1150	71	7,1	109	108,0	108,0	
4	1000	31	15,5	101	105,0	101,0	A. m. 100 div. = 50 a.

N° 3. — *Caractéristique en charge d'une génératrice à courant continu à excitation en dérivation.*

Essai du ....

Dynamo N° ....., 20 a, 120 v.
t/m normal 1600.
Résistance constante du circuit d'excitation 126,3 Ω.

N^{os} des relevés.	T/M.	COURANT d'excitation.		COURANT extérieur.		D. D. P. aux bornes.		D. D. P. au t/m normal.	OBSERVATIONS.
		Lectures.	Ampères.	Lectures.	Ampères.	Lectures.	Volts.		
1	1600	95	0	0	0	120	120	120,0	A. m. excit. 100 div. = 1 a. A.m.circuit 100 div. = 10 a. V. m. 150 div. = 150 v.
6	1500	80	0,80	35,6	35,6	101	101	106,5	

N° 4. — *Caractéristique en charge d'une génératrice à courant continu à excitation en série.*

Essai du.......

Dynamo N°...... 60 a.
t/m normal 1500.

NUMÉROS des relevés.	T/M.	COURANT d'excitation		D. D. P. AUX bornes.		D. D. P. au t/m normal.	OBSERVATIONS.
		Lectures.	Ampères.	Lectures.	Volts.		
1	1500	0	0	21	4,2	4,2	A. m. 100 div. = 50 a.
2	1400	20	10	110,5	22,1	24,0	V. m. 150 div. = 30 v

N° 5. — *Essai d'un moteur série à courant continu.*

Essai du.... ..

Moteur N°....... 736 w. 90 v.
Frein à peson. Bras du levier 0,12 m.
Constante du frein 0,123 P. N. wats.

NUMÉROS des relevés.	T/M.	COURANT. Lectures.	COURANT. Ampères. I.	WATTS fournis 90I = W_1.	FREIN. Poids placé	FREIN. Ressort. N° de l'échelle.	FREIN. Ressort. Poids correspondant.	FREIN. Poids effectif.	PUISSANCE UTILE. W_2.	RENDEMENT $\frac{W_2}{W_1}$.	OBSERVATIONS.
1	895	23	2,30	207,0	0	0	0	0	0	0	A. m.
2	670	31,5	3,15	283,5	1,500	5	0,200	1,300	107	0,38	100 div. = 10 a.

N° 6. — *Caractéristique comme moteur à vide d'une dynamo à courant continu.*

Essai du.......

Génératrice N° 60 a. 200 v.
t/m normal 1000.
Excitation séparée.

N°s des relevés.	TENSION aux bornes. Lectures.	TENSION aux bornes. Volts. E.	COURANT d'excitation. Lectures.	COURANT d'excitation. Ampères.	COURANT principal. Lectures.	COURANT principal. Ampères. I.	PUISSANCE fournie E. I.	OBSERVATIONS.
1	115	230	51	1,53	50	5,00	1150	A. m. excit. 100 div. = 3 a.
2	109	218	48	1,44	51	5,10	1112	A. m. princ. 100 div. = 10 a.
								V. m. 150 div. = 300 v.

N° 7. — *Fonctionnement d'un moteur synchrone triphasé et tracé des courbes en V à diverses charges.*

Essai du ......

Moteur N° ...., 110 v. ∼ 40.
Nombre de pôles : 6; t/m 800.
Frein de Prony, bras de levier $0^m,70$.
Constante du frein 575,3 P. watts.

N°s des relevés.	COURANT d'excitation. Lectures.	Ampères.	INTENSITÉ par phase.	WATTMÈTRES. N° 1. Lectures.	Watts. W_1.	N° 2. Lectures.	Watts.	PUISSANCE fournie $W_1 \pm W_2$.	FREIN. Poids.	Puissance utile.	OBSERVATIONS.
1	3,4	1,7	12,2	211	1055	20	120	935	0	0	A. m. c. c. 100 = 50 a.
2	4,2	2,1	1,6	179	895	5	30	865	0	0	A.m.alt.lecture directe
											W. m_1 c. = 5.
											W. m_2 c. = 6.

N° 8. — *Essai d'un moteur asynchrone monophasé.*

Essai du ......

Moteur N° ..... 110 v. ∼ 42.
Nombre de pôles 2. t/m au synchronisme 1260.
Bras de levier du frein $0^m,65$.
Constante du frein 0,67. P. N. watts.

N°s des relevés.	INTENSITÉ du courant.	WATTMÈTRE. Lectures.	Watts W_1.	T/M APPARENT du disque.	T/M DU MOTEUR calculé.	GLISSEMENT en pour cent.	FREIN. Poids.	Puissance utile W_2.	RENDEMENT $\frac{W_1}{W_2}$.	OBSERVATIONS.
1	1,5	18,4	92,0	1	1258	0	0	0	0	A. m. lecture directe.
2	1,9	41,5	207,5	5	1250	0,8	0,100	0,84	0,41	W. m. c. = 5.
										Rapport du t/m du moteur à celui du disque 2.

N° 9. — *Rendement organique d'un moteur à vapeur.*

Essai du...... Moteur compound de 30 chevaux.

Nos des relevés.	T/M.	PRESSION moyenne.				PUISSANCE indiquée.					FREIN.		PERTES ORGANIQUES $P_i - P_u$.	RENDEMENT organique.	OBSERVATIONS.
		G. C.		P. C.		G. C.		P. C.		Totale P_i	Poids.	Puissance utile P_u.			
		AV.	AR.	AV.	AR.	AV.	AR.	AV.	AR.	w.	kg.	w.			
															Pressions au manom. : 1^h..... 6^{kg} 1^h15... $5^{kg},9$

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE I.

BUT ET ORGANISATION DES ESSAIS.

CHAPITRE II.

MÉTHODES GÉNÉRALES D'ESSAIS.

CHAPITRE III.

ESSAIS DES MACHINES A COURANT CONTINU.

CHAPITRE IV.

ESSAIS DE MACHINES A COURANT ALTERNATIF.

CHAPITRE V.

ESSAIS DES GROUPES ÉLECTROGÈNES.

CHAPITRE VI.

COMPLÉMENT.

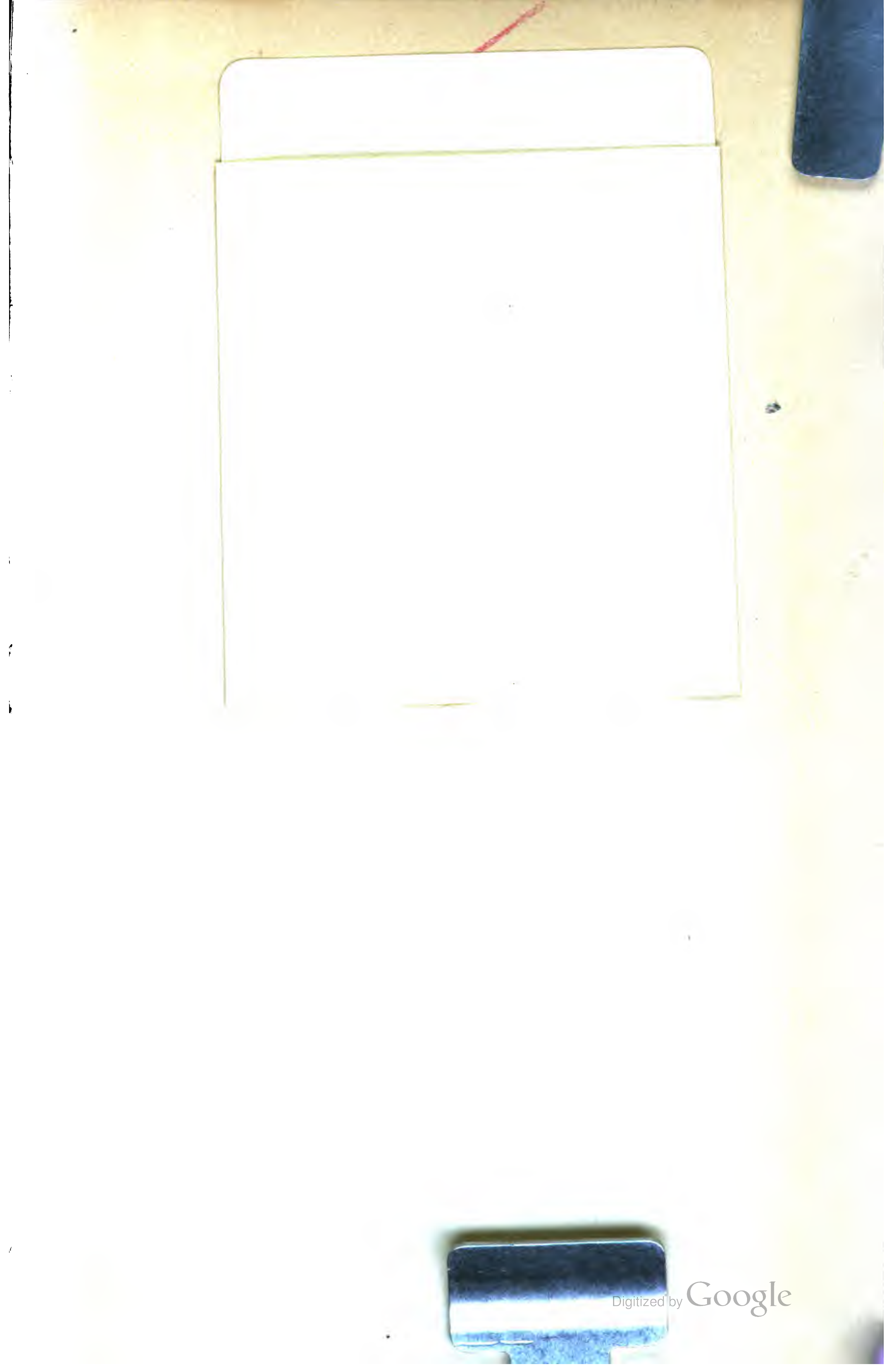
CHAPITRE VII.

RÈGLEMENTS DIVERS RELATIFS AUX ESSAIS DES MACHINES ET APPAREILS ÉLECTRIQUES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

PARIS — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,

32966 Quai des Grands-Augustins, 55.




89089710859
b89089710859a
Digitized by Google